INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2019 • N.º 508 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

APRENDER MIENTRAS DORMIMOS

Nuevos experimentos sobre estimulación del aprendizaje durante el sueño



QUÍMICA
El nacimiento de la attoquímica

COSMOLOGÍA
Las primeras galaxias del universo

BIOGEOGRAFÍA
¿Cómo se distribuyen las especies en la Tierra?

INFORME ESPECIAL
LA CIENCIA DE LA DESIGUALDAD
Por qué la creciente desigualdad económica está dañando el bienestar humano y la biosfera



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
APRENDER MIENTRAS DORMIMOS | LA CIENCIA DE LA DESIGUALDAD | EL NACIMIENTO DE LA ATTOQUÍMICA
N.º 508
ENERO 2019

ciencias

FUNDACIÓN
RAMÓN ARECES

Por undécimo año consecutivo, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature, unidos con el objetivo de impulsar la divulgación científica, organizan conjuntamente un ciclo de conferencias y debates en ciencias, abordando cuestiones de actualidad y trasladando a la sociedad innovadores temas científicos y los avances más importantes en estas áreas, tratadas por grandes expertos internacionales.

Con esta iniciativa, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature no intentan crear únicamente unas jornadas de debate científico o médico, sino generar una reflexión colectiva sobre materias, que en mayor o menor grado, afectan a toda la sociedad. De esta manera, se pretende presentar estos avances científicos, interpretándolos y traduciéndolos desde la perspectiva de los beneficios y las ventajas que pueden suponer para el bienestar y la calidad de vida de la sociedad, pero también desde sus posibles riesgos e inconvenientes, destacando e incidiendo en la importancia de la investigación en su progreso.

Inteligencia artificial aplicada a la Biomedicina

LO QUE NOS DEPARA EL FUTURO

El campo de la **inteligencia artificial** llamado *deep learning* o *machine learning* ha evolucionado de forma exponencial en los últimos años y está revolucionando el campo de la Biomedicina. La disponibilidad de cantidades enormes de información médica (*big data*), en particular imágenes, y el desarrollo de algoritmos para extraer patrones de información y tomar decisiones "inteligentes" a partir de los datos, están haciendo avanzar de forma muy rápida el diagnóstico y la estratificación de pacientes. Estudios recientes han demostrado la utilidad de aplicar inteligencia artificial para el diagnóstico de enfermedades como el cáncer, las enfermedades cardiovasculares y las retinopatías. En estos casos, los algoritmos han aportado resultados tan buenos o incluso mejores que los estándares establecidos por expertos. En este sentido, la agencia reguladora del medicamento americana (FDA) ha aprobado el uso de la inteligencia artificial en varios campos de la Medicina y es de esperar que estas técnicas tengan un efecto significativo en la práctica de la Medicina en el siglo XXI. En esta 11ª edición del ciclo de conferencias y debates en ciencia se cubrirán aspectos básicos de la inteligencia artificial y su aplicación a la Biomedicina. También se discutirá el futuro potencial de esta técnica en el campo clínico y los aspectos socioeconómicos que esta revolución tecnológica puede tener en la sociedad actual y futura.

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
SPRINGER NATURE

Inteligencia artificial aplicada a la Biomedicina

LO QUE NOS DEPARA EL FUTURO

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BIOMEDICINE

What the future holds for us

Madrid | Jueves, 7 de febrero de 2019 | 17:30 h

INFORMACIÓN E INSCRIPCIONES
www.fundacionareces.es
C/ Vitruvio, 5 • 28006 Madrid
Metro: República Argentina / Gregorio Marañón
91 515 89 80
Fecha de inscripción: hasta el 6 de febrero de 2019

Intervenciones

Introducción
Moderadora
Erika Pastrana
Editora ejecutiva de Nature Research, Nueva York, EE.UU.

Inteligencia artificial y ciencia de datos: mirando hacia el futuro
Prof. José Hernández-Orallo
Departamento de Sistemas Informáticos y Computación. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Desarrollo de inteligencia artificial y tecnologías éticas para el sector de la salud
Dr. Tarek R. Besold
Director de Inteligencia Artificial @ Telefónica Innovación Alpha Health, Barcelona, España.

Robótica flexible para interaccionar de manera intuitiva con los robots
Dra. Jamie Paik
Directora de Laboratorio de Robótica Reconfigurable, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laussane, Suiza.

Potencial de la inteligencia artificial/*deep learning* para mejorar el tratamiento oncológico
Dra. Kara L. Davis
Departamento de Pediatría. Centro Bass del Instituto de Investigación de Salud y del cáncer y leucemias pediátricos.
Universidad de Stanford, Stanford, EE.UU.

SPRINGER NATURE Rosario Pino, 14 - 4ª Planta. 28020 Madrid. España | +34 91 555 40 62 | www.springerhealthcare.com

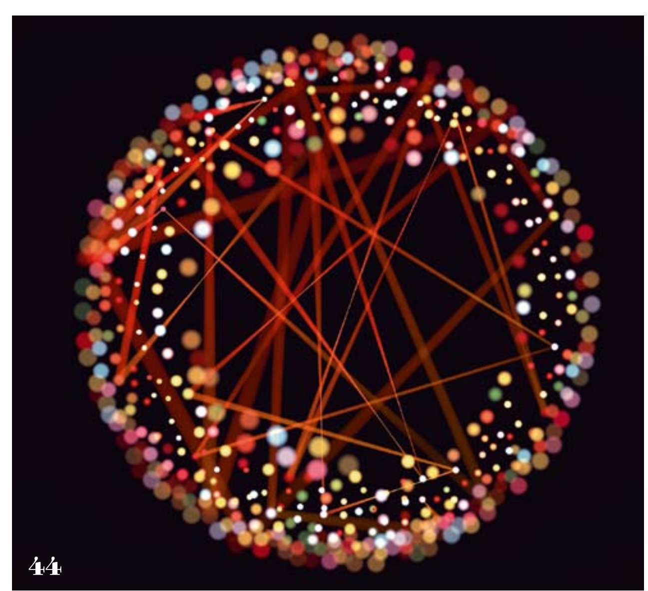
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Enero 2019, Número 508

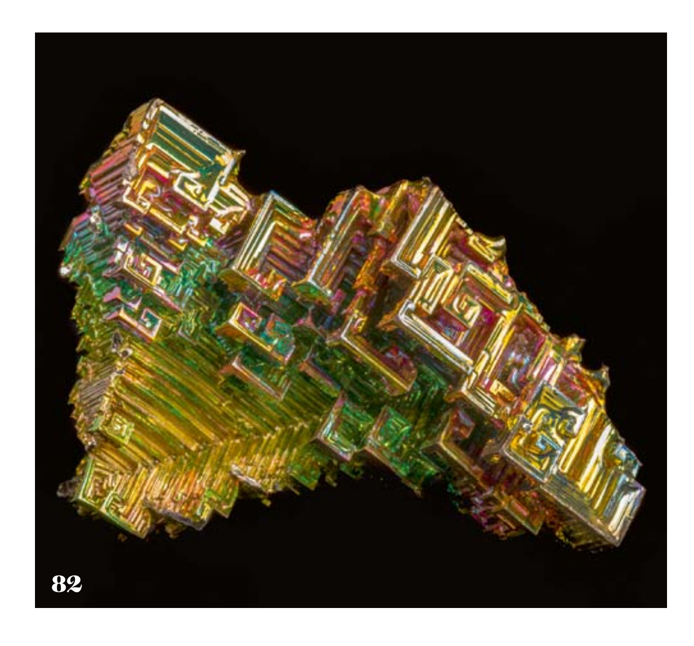
26

ARTÍCULOS

RON MILLER


6


44


82

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La idea de aprender mientras dormimos, presente en la literatura y en la cultura popular, está siendo explorada ahora por laboratorios acreditados de neurociencia. En ciertas fases del sueño, nuestro cerebro reactiva espontáneamente los recuerdos. Los investigadores tratan de averiguar cómo estos períodos sirven de hecho para reforzar los conocimientos que hemos adquirido durante el día. Fotografía de KatarzynaBialasiewicz/iStock.



Julio, Agosto y Octubre de 2018

AVIONES Y TEMPERATURA

En el artículo «Despegues en caliente» [Investigación y Ciencia, julio de 2018], Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik intentan explicar las razones por las que una ola de calor puede provocar la cancelación de vuelos. Sin embargo, incurren en algunas inexactitudes que nublan los conceptos que se tratan.

Así, el factor principal para que un avión tenga que limitar su carga debido a la longitud de pista disponible no es el aumento de la velocidad necesaria para volar —aunque algo influye—, sino el hecho de que, en esas condiciones de altitud y temperatura, los motores no alcanzan el empuje requerido para acelerar esa masa en la distancia disponible. El rendimiento del motor disminuye drásticamente a velocidades bajas, presiones bajas y temperaturas altas.

Hay otro motivo que puede provocar que un vuelo se cancele por altas temperaturas. Normalmente, los aviones se certifican para una temperatura máxima de «ISA + 35 ºC» (donde ISA son las siglas en inglés de «atmósfera internacional estándar»). A la elevación de Phoenix, la temperatura ISA es de unos 13 grados centígrados, luego dicho límite asciende a 48 grados. Por tanto, un piloto no despegará a temperaturas superiores. Existen también certificaciones para operar el avión en condiciones de elevada temperatura y altitud (*hot & high*), pero conllevan un aumento de los costes de adquisición y mantenimiento.

Por último, en lo que respecta a la descripción de los efectos del viento en crucero, señalar que la fuerza de sustentación depende no solo de la velocidad, sino también del ángulo del ala con respecto al flujo de aire. Por regla general, a unos 10.000 metros de altitud, el avión puede volar a entre 600 y 900 kilómetros por hora sin subir ni bajar.

Emilio Ruiz Enríquez
Piloto de líneas aéreas
Exprofesor en la Academia General del Aire

JUEGOS VITALES

El artículo de Erik Vance «Sobreestimular a los bebés» [Investigación y Ciencia, agosto de 2018] describe con sensatez las limitaciones de ciertos juguetes, videos y otros artículos modernos para aumentar el desarrollo mental de los niños pequeños. Sin embargo, hay un aspecto que el autor pasa por alto: la sustitución de los juegos sociales por juegos «pasivos», que generalmente tienen lugar en solitario a través de un televisor, ordenador o teléfono, y sin ejercicio físico.

Los juegos sociales resultan clave para el desarrollo mental y físico de los niños. Quizá lo más importante sea que se basan en reglas que han de ser aceptadas por todos los participantes, y solo son divertidos si todos cumplen esas reglas. Los niños que juegan con teléfonos móviles pueden engañar a voluntad: son los dueños de su propio universo digital y pueden tornarse egocéntricos, sin prestar atención a la resolución de los conflictos sociales.

Eduardo Kausel
Instituto de Tecnología de Massachusetts

¿SOMOS ESPECIALES?

En su artículo «Solos en el Vía Láctea» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2018], John Gribbin repasa la larga e improbable cadena de afortunadas coincidencias que nos han permitido estar hoy aquí para concluir que, como especie, somos especiales.

Pero ¿qué entendemos por ser «especiales»? ¿Solo afortunados? En este contexto, podríamos caer en la tentación de incluir en el término ciertos matices filosófico-religiosos de superioridad. En tal caso, ¿cuándo empezamos a serlo? ¿Los neandertales también lo eran? ¿Y *Homo habilis*? ¿Tiene nuestra existencia algún propósito?

De no ser así, deberíamos reconocer con humildad que somos únicamente un producto más de la evolución y que todas nuestras capacidades y singularidades emergen compartiendo la práctica totalidad de nuestro genoma con los chimpancés y la misma maquinaria celular que las levaduras. Rebobinar todos los acontecimientos posibles hasta el *big bang* e ir calculando sus probabilidades podría causarnos una falsa impresión. También es muy improbable acertar la lotería, y no creo que los afortunados deban por ello considerarse especiales.

¿Hay vida en nuestra galaxia? Tal vez no tengamos que buscar muy lejos. Pudo haberla en Marte y podría haberla en Encélado. ¿Y otra civilización? Con nuestro nivel técnico, y si la nuestra es de las primeras, quizá podríamos descartarlo en un radio de unos pocos miles de años luz, no más.

A pesar de todos los conocimientos adquiridos desde la revolución copernicana, solemos olvidar con arrogancia que solo comprendemos el 4 por ciento de todo lo que nos rodea (la materia bariónica) y de nuestro lugar en el cosmos. Ya sea como tribu, como raza o como especie, siempre nos ha gustado considerarnos «especiales». No lo podemos evitar.

Miguel Ángel Lapeña
La Alberca, Murcia

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Hasta el 6 de enero

Descuento del 15%

sobre **todos** nuestros productos, suscripciones y ofertas existentes

Código promocional

FELIZNAVIDAD18

www.investigacionyciencia.es



¡Aprovecha para regalar ciencia!



1. Compra a través de la web (suscripciones, revistas, libros...) y marca la casilla «Regalo» en la cesta.
2. Personaliza tu mensaje de felicitación.
3. Nosotros nos encargamos de que el destinatario reciba puntualmente tu obsequio y la tarjeta de felicitación a su nombre.



LOS CIENTÍFICOS están desarrollando un método para medir el reloj corporal interno.

GETTY IMAGES

CRONOBIOLOGÍA

Medir el reloj biológico

Un análisis de sangre que cuantificara el tiempo interno permitiría ahondar en los trastornos del sueño y en diversas enfermedades

¿Es usted madrugador o trasnochador? Estos calificativos andan cada vez más en boca de los científicos, pues todo apunta a que tienen una base genética. Esa inclinación dependería del «cronotipo», o reloj biológico de cada cual, que en algunos casos mostraría un notable desfase con la hora marcada en el reloj de pared. Ahora, tres equipos de investigación parecen encaminados hacia un mismo modo de leer ese reloj interno mediante muestras de sangre. Un método rápido, preciso y barato como este permitiría aprovechar todas las ventajas de los tratamientos cuya eficacia depende del momento del día y facilitaría el estudio del vínculo entre los desajustes del reloj biológico y varias enfermedades crónicas.

El mecanismo que controla los biorritmos diarios es el reloj circadiano. Ayuda a regular la actividad de en torno al 40 por ciento de nuestros genes, orquestando los ritmos del apetito, la temperatura y la presión arterial. No hay prácticamente célula en el cuerpo que no posea su maquinaria circadiana; el reloj maestro que las sincroniza a todas (una diminuta región del cerebro llamada núcleo supraquiasmático) controla las concentraciones de hormonas determinantes del ciclo de sueño y vigilia. Los cronotipos son tan diversos que el reloj interno de dos personas puede diferir en ocho horas o más. «Pueden compartir el mismo lecho sin coincidir en él», en palabras del cronobiólogo Achim Kramer, de la Universidad de Medicina de la Charité en Berlín, que dirige uno de los grupos que está desarrollando la nueva técnica.

El método de referencia actual para medir el reloj interno, el ascenso de la melatonina con la atenuación de la luz, exige numerosas muestras de sangre o saliva, tomadas cada hora en condiciones de penumbra. En cambio, los tres trabajos novedosos detallan una técnica más sencilla que solo precisa una o dos muestras de sangre (según el método descrito por cada estudio), por lo que las mediciones del tiempo biológico pasarían a formar par-



BOLETINES A MEDIDA
Elige los boletines según tus preferencias temáticas y recibirás toda la información sobre las revistas, las noticias y los contenidos web que más te interesan.
www.investigacionyciencia.es/boletines

te de la práctica médica cotidiana. El enfoque general implica evaluar la actividad fluctuante de los genes mediante la medición de las variaciones en las concentraciones sanguíneas del ARN. Los algoritmos informáticos «aprenden» así qué genes dan las mejores indicaciones del tiempo biológico. «Todos avanzamos en la misma dirección» en este campo de investigación, asegura el fisiólogo Derk-Jan Dijk de la Universidad de Surrey, que dirige otro de los grupos. «Estamos expectantes.»

La especialista en bioinformática Rosemary Braun, de la Universidad del Noroeste, ha dirigido el último de tales estudios, que salió a la luz el pasado septiembre en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Según ella, el método de su equipo sería el más generalizable, al poder aplicarse con cualquier técnica disponible que analice la actividad génica. No obstante, requiere dos muestras de sangre, mientras que el método de Kramer (publicado también en septiembre, pero disponible en Internet desde junio, en el *Journal of Clinical Investigation*) y el de Dijk (publicado en febrero de 2017 en *eLife*) funcionan con una sola muestra. Kramer y Dijk han validado sus enfoques cotejándolos con el método de referencia; no así el equipo de Braun, lo cual dificulta las comparaciones directas. «Pudiera ser que su medición fuera la mejor, pero no lo sabemos», aclara Dijk.

El método del equipo de Kramer concuerda con el de la melatonina, con un lapso de una media hora. Una explicación para esa exactitud, según Kramer, radica en que se extrae un solo tipo de células sanguíneas, los monocitos, que experimentan fuertes oscilaciones circadianas. Ello exige un análisis sanguíneo más complejo que el de los demás grupos, pero el estudio de Kramer es el más próximo a la aplicación clínica, opina Dijk.

El paso siguiente consistirá en averiguar hasta qué punto cada método resulta idóneo para las personas con el ritmo circadiano alterado debido a que sufren el síndrome de desfase horario (*jet lag*), el cambio de turno laboral o una dolencia, explica Dijk. Estos trastornos del sueño causan numerosos efectos nocivos para la salud, los cuales, según algunos indicios, podrían mitigarse con el reajuste del reloj interno mediante la exposición a la luz o con la administración de melatonina (la hormona del sueño). La nueva técnica permitirá a los médicos supervisar la eficacia de estos tratamientos. Las alteraciones del ritmo circadiano también han sido vinculadas con afecciones como la diabetes, cardiopatías, enfermedades neurodegenerativas o depresión. Braun afirma: «Sabemos que hay vínculos, pero ignoramos cómo actúan exactamente». Contar con mediciones sencillas del reloj interno facilitaría su estudio.

La eficacia de algunos tratamientos farmacológicos, como la quimioterapia o los antihipertensivos, varía con la hora del día en que se administran. Aprovechar esta circunstancia para sacar el máximo provecho de un medicamento se denomina cronofarmacología. Puesto que el reloj interno de las personas probablemente condiciona el resultado, poder medirlo con más facilidad ayudaría a los médicos a personalizar el tratamiento. «Esto significaría dosis más pequeñas, menos efectos secundarios y mayor eficacia. Las posibilidades son fascinantes», apunta Braun. Con todo, no está claro cuán eficaz resulta tal sincronización, pues ha resultado difícil separar a los pacientes por cronotipo en los estudios. Esta técnica podría fomentar ese tipo de estudios. Agrupar a los pacientes de ese modo también podría mejorar la eficacia de los nue-

CIENCIAS DE LA TIERRA

Fisuras nocturnas

Los glaciares del Himalaya se agrietan durante la noche, un fenómeno que podría acelerar su fusión



SISTEMA FORMADO por los glaciares Trakarding y Trambau, en Nepal.

EVGENY A. PODOLSKIY

Evgeny A. Podolskiy, geocientífico de la Universidad de Hokkaido, hizo su primer viaje al Himalaya en octubre de 2017. Una vez allí, lo que más le sorprendió no fueron las espectaculares vistas del Everest, sino un fenómeno inesperado: los fuertes estruendos que oía cada noche mientras vivía y trabajaba en la zona.

«El hielo se estaba resquebrajando», explica Podolskiy, que ha investigado varios entornos glaciares en todo el mundo, Groenlandia y los Alpes incluidos. «Nunca había encontrado algo así.» Más allá de una observación anecdótica en el Ártico, no existía ningún caso documentado de tales fracturas nocturnas en glaciares.

El agrietamiento es una mala noticia para los más de mil millones de asiáticos que dependen del agua de estos depósitos congelados. «Este tipo de desgaste diario puede provocar que los glaciares se vuelvan más frágiles y, por tanto, se derritan con mayor facilidad», comenta el investigador. Como consecuencia, habrá menos agua disponible a medida que pase el tiempo.

Para determinar la causa de los agrietamientos, Podolskiy y sus colaboradores instalaron sismómetros a lo largo del sistema formado por los glaciares Trakarding y Trambau, al este de Nepal, un método que nunca se había usado en el Himalaya. Al hacerlo, observaron algo interesante. Según refieren en un artículo publicado en septiembre en *Geophysical Research Letters*, los ruidos provenían de aquellas superficies de hielo en las que no había fragmentos de roca. Además, cuanto más caía la temperatura del aire durante la noche, más intensas se volvían las señales.

Al mismo tiempo, el hielo emitía poco ruido cuando se hallaba cubierto por una capa de rocas sueltas, y se mantenía en silencio si el grosor de la capa superaba los 60 centímetros. «Los restos protegen los glaciares de las fluctuaciones de temperatura que hacen que el hielo se expanda y se contraiga de manera cíclica»,

vos tratamientos en los ensayos clínicos, según Kramer.

El equipo de Dijk dio a conocer otro gran avance en un estudio publicado en línea el pasado septiembre en *Sleep*. Con la misma estrategia, lograron señalar (con una precisión superior al 90 por ciento) a los participantes que no habían dormido la noche anterior. La prueba podría ayudar también a la policía a identificar a los conductores involucrados en accidentes de tráfico que no han dormido lo debido, o a los jefes a valorar si sus pilotos de aerolínea u otro personal que desempeñe labores críticas para la seguridad son aptos para trabajar. La prueba analiza 68 genes, que coinciden muy poco con los que se emplean para determinar el reloj interno, pero cuyas funciones biológicas brindan información sobre la repercusión de la pérdida de sueño en la salud.

Combinadas, las pruebas del reloj interno y de la privación del sueño son muy potentes, afirma Dijk. «Que uno rinda bien a las seis de la mañana depende de su reloj circadiano, pero también del tiempo que haya permanecido despierto.»

—Simon Makin

indica Podolskiy. «Cuando la temperatura desciende de manera brusca, como sucede a grandes altitudes, el hielo desprotegido se contrae con rapidez y se fractura.» Sin embargo, el alcance de esa protección es limitado, ya que menos de una quinta parte de la superficie de los glaciares del Himalaya se encuentra cubierta de rocas.

Walter Immerzeel, hidrólogo de la Universidad de Utrecht que trabajó en el Himalaya durante más de 16 años y que no participó en el trabajo, considera fascinante el hallazgo. Según el investigador, el estudio revela «una nueva amenaza para la estabilidad de los glaciares». Las grietas no solo producen daños mecánicos, sino que actúan también como conductos para el agua y el calor, por lo que pueden acelerar de manera notable la pérdida de hielo, añade.

El equipo de Podolskiy planifica ahora sus próximos estudios en el Himalaya. «Un problema acuciante consiste en averiguar cómo se desarrollan y evolucionan las grietas a lo largo del año y cómo afectan al flujo de agua en el interior del hielo», apunta el investigador. «Eso será clave para comprender mejor cuál es el futuro de los depósitos de agua de Asia en un mundo con un clima cambiante.»

—Jane Qiu



EL MANATÍ antillano, especie amenazada.

GIOVANNI GROTTO, ALAMY

CONSERVACIÓN

Cantos de manatí

Un nuevo método registra este esquivo mamífero a partir de la grabación de sus vocalizaciones

Los biólogos que quieren censar los manatíes antillanos de Costa Rica y Panamá afrontan un reto notable: viven en aguas cenagosas, lo que prácticamente impide verlos. «He remado cada día a lo largo y ancho del río San San [en Panamá] durante dos años y todo lo que he podido ver son algunos hocicos», se lamenta el biólogo e informático Mario Rivera-Chavarría. «Pude oírlos, pero no conseguí ver ninguno.» En 2013, Rivera-Chavarría, entonces en la Universidad de Costa Rica, y sus colaboradores en el Instituto Smithsoniano de Investigación Tropical emprendieron un censo de manatíes en los humedales de San San Pond Sak en Panamá, una zona fronteriza con Costa Rica que abarca el río San San. A bordo de una embarcación equipada con sónar de barrido lateral, que genera imágenes a partir del eco sonoro rebotado por los animales sumergidos y su entorno, el equipo estimó que la población en un tramo de 18 kilómetros del San San variaba entre un escaso par de manatíes en algunos meses y 33 en otros.

El problema estriba en que el sónar resulta perturbador para estos animales amenazados, por lo que Rivera-Chavarría quería demostrar que era posible llevar a cabo el censo con una técnica menos invasiva. Las vocalizaciones de los manatíes poseen rasgos distintivos que un oído entrenado o un ordenador saben reconocer como pertenecientes a un individuo u otro. El experto registró los cantos con micrófonos subacuáticos colgados de su kayak mientras surcaba a remo el San San.

Su colega Jorge Castro, informático en el Centro Nacional de Alta Tecnología de Costa Rica, diseñó un algoritmo para contabilizar automáticamente los manatíes a partir de las grabaciones. Castro demostró, con una muestra de 54 reclamos pertenecientes a cuatro manatíes, que su algoritmo poseía una precisión del cien por cien.

El algoritmo divide el proceso en cuatro etapas: separación de las grabaciones en tramos cortos, anulación del ruido de fondo, etiquetado de los reclamos de los manatíes y agrupación de los correspondientes a cada individuo. La cancelación del ruido de fondo es la más larga, por lo que para agilizar el proceso, Castro y su colaborador Esteban Meneses recurrieron a un superordenador. Tradujeron el algoritmo a un lenguaje de programación que permitió ejecutar las tareas en paralelo, lo cual aceleró el proceso 120 veces, según relataron el pasado julio en el Taller Internacional de Inteligencia Bioinspirada, del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Ahora, Castro y su equipo planean refinar el algoritmo para identificar los reclamos del zorzal pardo, o yigüirro (*Turdus grayi*), el ave nacional de Costa Rica. Roberto Vargas-Masís, experto en bioacústica de la Universidad Nacional de Educación a Distancia de ese país, que no ha participado en el estudio del manatí pero que pretende hacerlo en la investigación ornitológica, afirma: «Con esta técnica podremos recabar y analizar grandes volúmenes de datos y averiguar con suma rapidez si la especie está presente en una región concreta».

—Debbie Ponchner

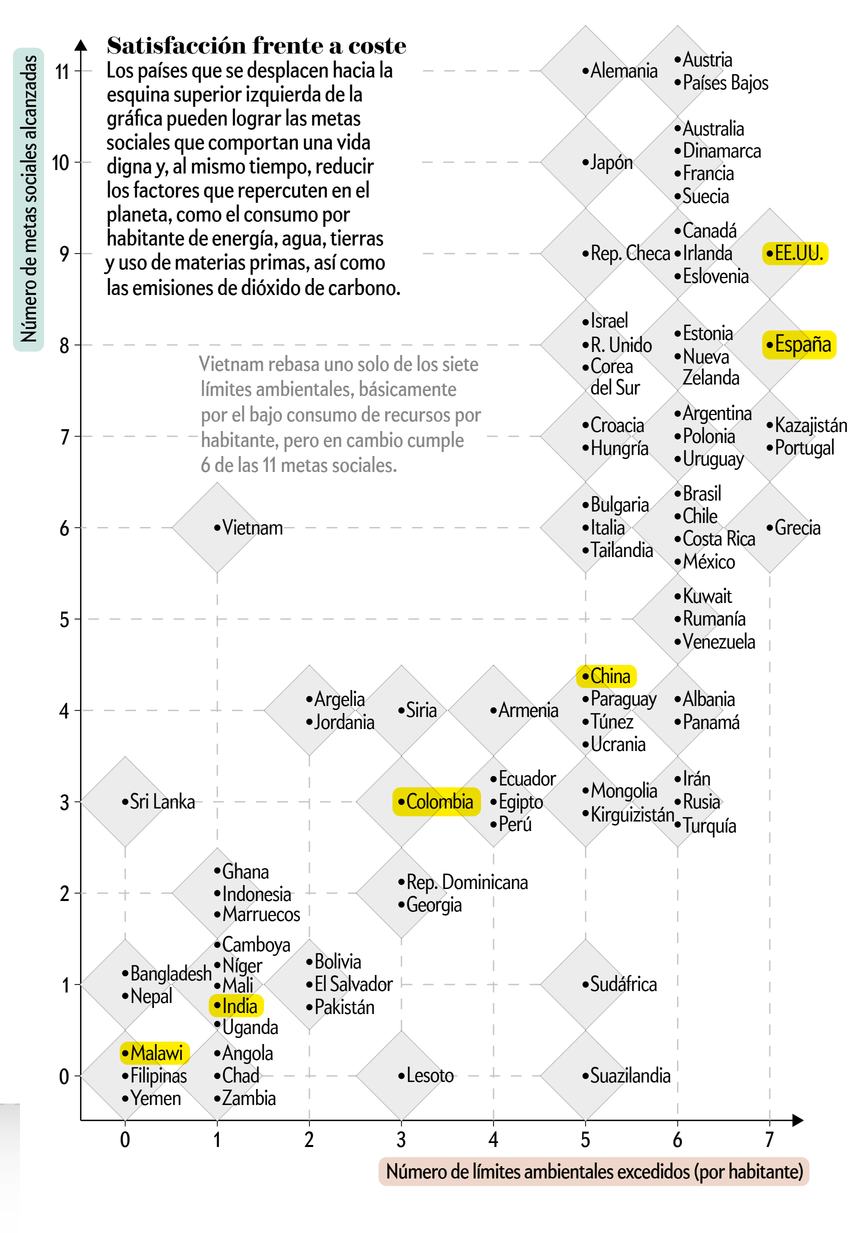
SOSTENIBILIDAD

Una buena vida para todos

¿Puede la humanidad vivir dignamente sin esquilmar el planeta?

Muchas naciones ricas alcanzan un conjunto de metas sociales que brindan a su ciudadanía una vida digna, tal y como propugna la ONU en sus Objetivos de Desarrollo Sostenible. Pero, según un estudio novedoso, para conseguir ese fin exceden su cuota de recursos naturales y rebasan los límites de impacto ambiental necesarios para salvaguardar el planeta (*esquina superior derecha de la gráfica principal*). Los países menos desarrollados consumen menos recursos y, por tanto, ejercen un impacto menor, pero no logran tantas metas sociales (*esquina inferior izquierda de la gráfica principal*). La solución: «Los países ricos pueden consumir menos sin por ello renunciar a su calidad de vida», asegura el director del estudio Daniel W. O'Neill, de la Universidad de Leeds. De ese modo quedarían más recursos disponibles para los países menos desarrollados, en los que sería posible mejorar las condiciones de vida de sus habitantes sin sobrepasar los límites ambientales seguros (*gráficas circulares, abajo*).

—*Mark Fischetti*

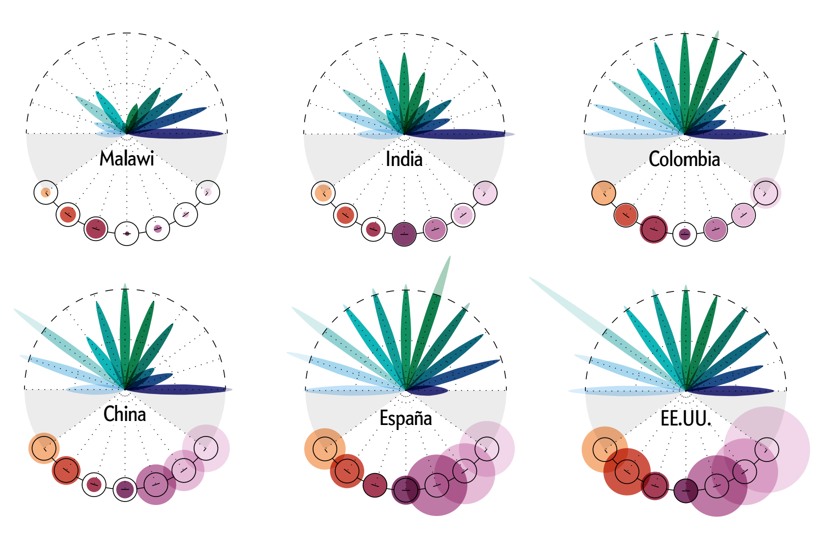


Metas y límites nacionales

Metas sociales
- A • Satisfacción con la vida
- B • Años de vida saludable
- C • Nutrición
- D • Saneamiento
- E • Ingresos suficientes
- F • Acceso a la energía
- G • Educación
- H • Apoyo social
- I • Derechos democráticos
- J • Equidad de ingresos
- K • Índice de empleo

Objetivo social cumplido
Exceso = despilfarro o perjuicio
No cumplido
A B C D E F G H I J K
L M N O P Q R
Límite ambiental
Cuota excedida
Dentro del límite de cuota

Límites ambientales
- L • Explotación de materias primas
- M • Explotación de tierras y mares
- N • Pérdida de cultivos y bosques
- O • Consumo de agua dulce
- P • Vertidos de nitrógeno
- Q • Vertidos de fósforo
- R • Emisiones de CO_2



FUENTE: «A GOOD LIFE FOR ALL WITHIN PLANETARY BOUNDARIES», POR DANIEL W. O'NEILL ET AL., EN *NATURE SUSTAINABILITY*, VOL. 1; 5 DE FEBRERO DE 2018. https://goodlife.leeds.ac.uk; FEDERICA FRAGAPANE (*gráficos*)

NEUROCIENCIA

El desvanecimiento de la voluntad

Descubiertas las redes cerebrales que intervienen en la sensación de control

Mientras Ryan Darby hacía su residencia en neurología atendió varios casos del llamado síndrome del miembro ajeno, un trastorno que siempre lo dejaba desconcertado. El afectado refiere que una de sus extremidades (a menudo una mano) parece actuar con voluntad propia. Toca y coge cosas o incluso desabotona la camisa mientras la otra mano hace lo contrario. Es incapaz de controlar la mano rebelde excepto si la agarran o



se sientan sobre ella. Parece haber perdido la sensación de control o agencia, esa percepción inequívoca de ser dueño de las propias acciones y un importante componente de la libre voluntad. «Es uno de esos síntomas que hace dudar de la propia mente y de cómo llega a concebir algunas de las grandes ideas», afirma Darby, ahora profesor de neurología en la Universidad Vanderbilt.

El síndrome del miembro ajeno surge a raíz de los daños que sufre el cerebro por un ictus. Pero, a pesar de que los pacientes refieren los mismos síntomas extraños, las lesiones radican en lugares distintos. «¿Puede ser que los daños se produzcan en partes distintas de la misma red cerebral?», se preguntaba Darby. Con el fin de averiguarlo, él y sus colaboradores compilaron los datos de neuroimágenes de personas afectadas por el síndrome. También examinaron el mutismo acinético, otro trastorno que anula el deseo de moverse o de hablar sin que exista impedimento físico. Con una nueva técnica, compararon la localización de las lesiones con una plantilla de las redes cerebrales (correspondientes a grupos de regiones que a menudo se activan a la par).

Las lesiones asociadas al síndrome del miembro ajeno se hallaban circunscritas en una red de zonas que están conectadas con el precúneo, una región vinculada hasta ahora con la consciencia y el control de sí mismo. En los pacientes con mutismo acinético, las lesiones afectan a otra red centrada en la corteza cingulada anterior, que se cree implicada en las acciones voluntarias. Ambas redes abarcan también otras regiones cerebrales que, cuando han sido estimuladas con electrodos en estudios anteriores, han alterado la percepción de la libre voluntad del individuo, señaló el equipo en octubre pasado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

El estudio apunta a que por lo menos ciertos componentes de la libre voluntad (la volición y el control de los movimientos) no están radicados en ninguna región cerebral definida, sino en un entramado de regiones. La percepción de la voluntad propia podría quedar rota por la alteración de cualquier parte de esa red.

«Es un modo imaginativo de usar datos que han estado ahí sin provecho durante décadas y de redefinirlos para aprender algo nuevo y dar sentido a cosas que no lo tenían», opina Amit Etkin, profesor de psiquiatría de la Universidad Stanford, ajeno al trabajo. El estudio de muchos otros trastornos cerebrales se beneficiaría de un planteamiento así, añade.

—*Bahar Gholipour*

THOMAS FUCHS *(ilustración)*; MUSEO ARQUEOLÓGICO NACIONAL *(neandertales)*

Erratum corrige

En el artículo **¿Por qué luchamos?** [por R. Brian Ferguson; Investigación y Ciencia, noviembre de 2018], en la página 67 se indica que el Mesolítico se inició alrededor de 970 a.C., en lugar de 9700 a.C.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

AGENDA

CONFERENCIAS

10 de enero
La química que esconde un óleo
Óskar González, Universidad del País Vasco
Biblioteca de Castilla-La Mancha
Toledo
ciencialacarta.com

15 de enero
La cueva de El Sidrón: Investigación interdisciplinar de un grupo neandertal
Marco de la Rasilla Vives, Universidad de Oviedo
Museo Arqueológico Nacional
Madrid
www.man.es



16 de enero
Las mentiras de la ciencia
Josep Clotet, Universidad Internacional de Cataluña
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
www.iec.cat

EXPOSICIONES

Hasta el 6 de enero
Enigmas de los orígenes: Grandes preguntas de la ciencia
Museo de L'Hospitalet
L'Hospitalet
www.museul-h.cat

A vivir que son cien años
Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es

OTROS

12 de enero — Charlas
Naukas Córdoba
Teatro Góngora
Córdoba
naukas.com

Hasta el 31 de enero (inscripciones)
Física de partículas y cosmología
Curso para profesores de secundaria
Instituto de Física Teórica
Campus de Cantoblanco UAM
Madrid
www.ift.uam-csic.es

GENÉTICA

¿Cuántos genes tiene nuestro genoma?

Quince años después de haberse presentado el primer borrador del genoma humano, todavía no hay un acuerdo sobre el número de genes que contiene

CASSANDRA WILLYARD



LA IDENTIFICACIÓN DE GENES sigue siendo un desafío, más de una década después de la finalización del Proyecto Genoma Humano.

© POGONICI/ISTOCK

Uno de los primeros intentos de calcular la cifra de genes del genoma humano consistió en meras conjeturas de genetistas achispados en un bar de Cold Spring Harbor, en Nueva York.

Era el año 2000, cuando todavía se trabajaba en una secuencia preliminar del genoma humano; los genetistas apostaban sobre la cantidad de genes que este presentaba, con cifras comprendidas entre decenas de miles y cientos de miles. Casi dos décadas después, provistos de datos reales, los científicos siguen sin ponerse de acuerdo sobre ese número. Tal desconocimiento, advierten, dificulta la detección de mutaciones asociadas a enfermedades.

El último intento de conocer la cantidad de genes, basado en datos de cientos de muestras de tejidos humanos, lo ha prepublicado en *bioRxiv* Michaela Pertea, de la Universidad Johns Hopkins, y sus colaboradores. Han referido casi 5000 genes no conocidos con anterioridad, de los cuales unos 1200 portan instrucciones para la síntesis de proteínas. Y el cómputo total de más de 21.000 genes codificadores de proteínas supone un salto considerable respecto a los cálculos anteriores, con cifras alrededor de 20.000.

Pero muchos genetistas todavía no están convencidos de que todos los nuevos genes propuestos resistan un examen minucioso. Sus críticas recalcan la dificultad de identificar genes nuevos e incluso de definir lo que es un gen.

«Se ha trabajado mucho en ello durante veinte años y aún no conocemos la respuesta», asegura Steven Salzberg, biólogo informático de la Universidad Johns Hopkins, cuyo equipo efectuó el último recuento.

Difícil de determinar

En 2000, con todos los expertos en genómica comentando cuántos genes humanos se identificarían, el investigador Ewan Birney organizó el concurso GeneSweep. Hoy codirector del Instituto Europeo de Bioinformática (EBI), en Hinxton, Birney aceptó las primeras apuestas en un bar durante un congreso anual de genética. El concurso llegó a contar con más de 1000 participantes y alcanzó un bote de 3000 dólares. Las cifras propuestas de genes se hallaron comprendidas entre más de 312.000 y poco menos de 26.000, con un promedio en torno a 40.000. Hoy en día, aunque el margen de los valores se ha reducido (la mayoría de ellos entre 19.000 y 22.000), el desacuerdo todavía persiste.

El equipo de Salzberg empleó datos del proyecto Expresión del Genotipo Tisular (GTEx, por sus siglas en inglés),

que secuenció ARN de más de 30 tejidos tomados de varios cientos de personas recién fallecidas. El ARN es el intermediario entre el ADN y las proteínas. Los investigadores deseaban identificar los genes que codifican una proteína y los que, no haciéndolo, desempeñan con todo una función importante en las células. Para ello, reunieron 900.000 millones de minúsculos fragmentos de ARN del GTEx y los alinearon con el genoma humano.

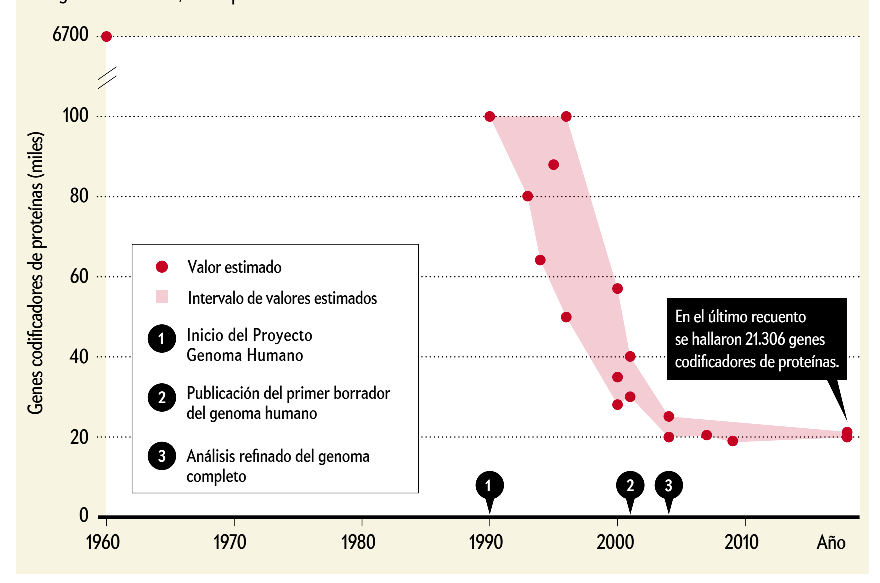
El hecho de que un tramo de ADN se exprese en forma de ARN no implica necesariamente que sea un gen. En consecuencia, el equipo intentó eliminar el ruido con diversos criterios de filtrado. Por ejemplo, comparó sus resultados con genomas de otras especies, con el argumento de que las secuencias que comparten animales lejanamente emparentados tal vez las haya mantenido la evolución por su utilidad, por lo que es probable que se trate de genes.

El equipo se quedó así con 21.306 genes codificadores de proteínas y 21.856 genes no codificadores, muchos más de los incluidos en las dos bases de datos de genes humanos más utilizadas. El conjunto de genes GENCODE, mantenido por el EBI, consta de 19.901 genes codificadores de proteínas y otros 15.779 no codificadores. Y RefSeq, la base de datos del Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI) de los Estados Unidos, alberga 20.203 genes que codifican proteínas y 17.871 que no lo hacen.

Kim Pruitt, investigadora del genoma del NCBI en Bethesda, Maryland, y anterior responsable de RefSeq, señala que la diferencia quizá se deba en parte al volumen de datos que analizó el equipo de Salzberg. RefSeq se basa en un conjunto de datos más antiguo que contiene 21.000 millones de secuencias cortas. GENCODE también emplea datos diferentes: son de un tipo que facilita el reconocimiento de transcritos pero puede pasar por alto algunos genes. Y hay otra diferencia importante. En GENCODE y RefSeq la revisión es manual, una persona examina la información sobre el gen y toma una determinación final. En cambio, el grupo de Salzberg se basó exclusivamente en programas informáticos para cribar los datos.

«Si a la gente le gusta nuestra lista de genes, puede que dentro de un par de años seamos el árbitro de los genes humanos», afirma Salzberg.

Sin embargo, muchos científicos necesitan más pruebas para convencerse



de que la última lista es acertada. Adam Frankish, biólogo informático del EBI que coordina la anotación manual de GENCODE, asevera que él y su grupo han examinado unos 100 de los genes codificadores de proteínas identificados por Salzberg. Según su evaluación, solo uno de ellos parece ser un verdadero gen codificador de proteínas. Y el equipo de Pruitt estudió alrededor de una docena de los nuevos genes codificadores de Salzberg, pero no encontró ninguno que cumpliera los criterios de RefSeq.

Salzberg reconoce que los nuevos genes de la lista de su equipo precisan validación por su grupo y por otros.

Otro factor de confusión en la tarea de recuento es la definición de gen, imprecisa y cambiante. Los biólogos solían considerar como genes las secuencias que codifican proteínas, pero luego se hizo evidente que ciertas moléculas de ARN no codificadoras ejercen cometidos de importancia en las células. Dictaminar cuáles son importantes, por lo que deberían catalogarse como genes, es discutible y podría explicar parte de las discrepancias entre el recuento de Salzberg y otros.

Un cómputo exacto de todos los genes humanos es fundamental para intentar desvelar los vínculos entre los genes y las enfermedades. Los genes no contabilizados suelen dejarse de lado, incluso aunque contengan mutaciones causantes de enfermedades, sostiene Salzberg. Pero la adición apresurada de genes a la lista de referencia también comporta riesgos, refiere Frankish. Un gen que luego resulte no serlo puede desviar la atención de los genetistas del problema real.

No obstante, la discordancia en la cifra de genes de las distintas bases de datos supone un inconveniente para los investigadores, comenta Pruitt. «Se desea una respuesta», añade, «pero la biología es complicada».

Cassandra Willyard
es periodista científica.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 558, págs. 354-355, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Thousands of large-scale RNA sequencing experiments yield a comprehensive new human gene list and reveal extensive transcriptional noise. Mihaela Pertea et al. Preimpresión en **bioRxiv http://doi.org/cq5s**, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Revolución aplazada. Stephen S. Hall en *IyC*, diciembre de 2010.
El código de la regulación genética. Michelle C. Ward y Yoav Gilad en *IyC*, abril de 2018.

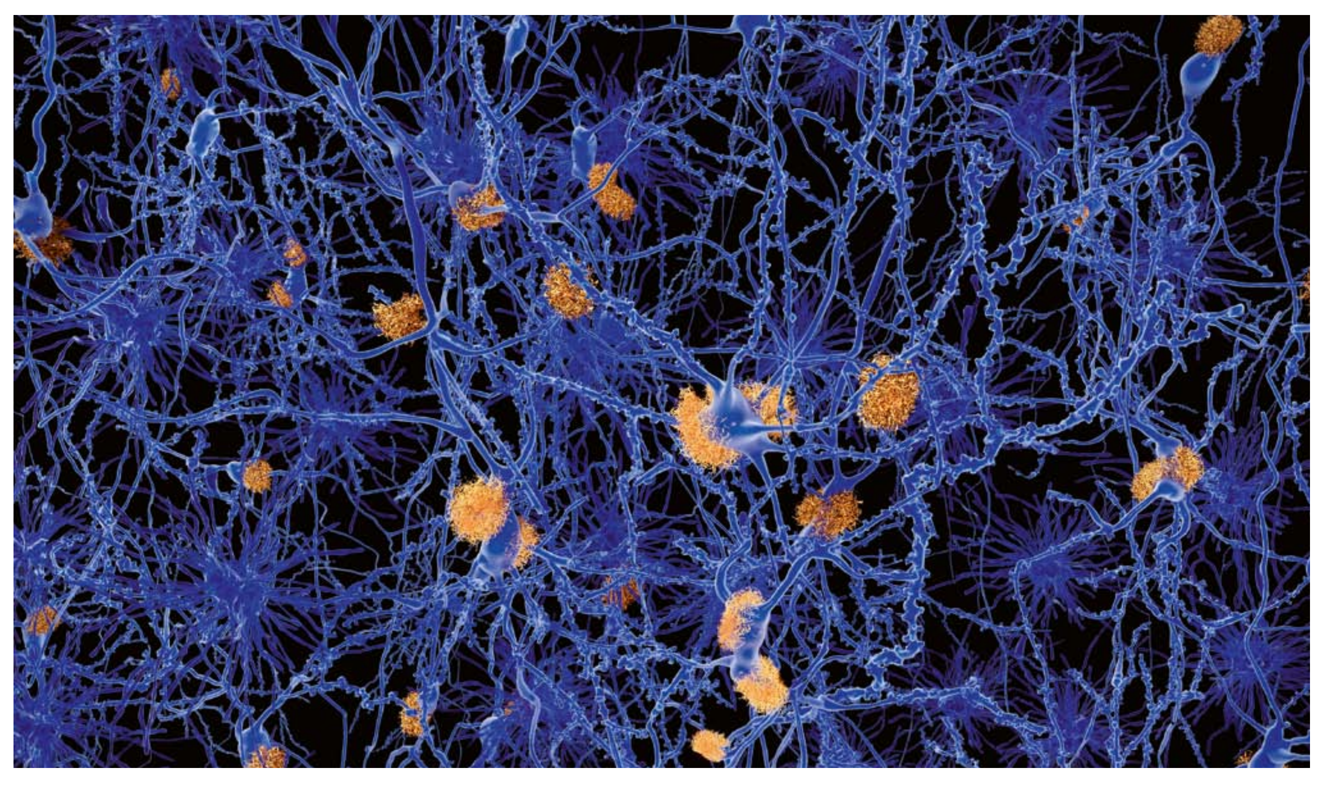
© NATURE; FUENTE: M. PERTEA Y S. L. SALZBERG

NEUROCIENCIA

Eliminación de desechos tóxicos del cerebro

Una red linfática interactúa con los vasos sanguíneos para depurar los productos de desecho del encéfalo, un mecanismo que interviene en la cognición, el envejecimiento y trastornos como el alzhéimer

MELANIE D. SWEENEY Y BERISLAV V. ZLOKOVIC



© SELVANEGRA/ISTOCKPHOTO

LA ACUMULACIÓN de la proteína amiloide β (*amarillo*) se ha relacionado con una mala depuración de los residuos tóxicos del tejido nervioso (*azul*).

Una red de vasos linfáticos actúa en tándem con el árbol vascular sanguíneo para regular el equilibrio hidroelectrolítico del organismo. Aunque el encéfalo no posee una red linfática propia, las membranas celulares que lo rodean, las meninges, sí la contienen. El sistema linfático meníngeo, descrito en 1787, se ha «redescubierto» en la presente década. Pero, ¿interviene este en las enfermedades cerebrales, igual que el sistema linfático general lo hace en las enfermedades sistémicas como el cáncer? En un artículo de *Nature*, Sandro Da Mesquita, de la Universidad de Virginia, y sus colaboradores revelan que los vasos linfáticos meníngeos contribuyen a mantener la actividad cognitiva y los niveles adecuados de proteínas en los líquidos encefálicos (un proceso denominado proteostasis). El hallazgo reviste gran interés para el envejecimiento normal y trastornos tales como la enfermedad de Alzheimer.

Los vasos linfáticos del organismo se encargan de eliminar de los tejidos el líquido intersticial, que contiene productos de desecho, como residuos celulares y moléculas tóxicas. El líquido intersticial forma la linfa, un líquido rico en proteínas que recorre el sistema linfático y retorna a la circulación sanguínea. En su camino, la linfa pasa por el filtro de los ganglios linfáticos, que desencadenan respuestas inmunitarias si detectan partículas extrañas.

El encéfalo no posee vasos linfáticos propios. En consecuencia, las proteínas y los desechos de su tejido principal (el parénquima) son transportados en el líquido intersticial al lado de las paredes de los vasos sanguíneos hasta alcanzar el líquido cefalorraquídeo (LCR), que circula por las meninges. Es bien sabido que las proteínas, los productos de desecho del metabolismo y otras moléculas presentes en estos líquidos pueden eliminarse del cerebro mediante su paso a través de las paredes de los vasos sanguíneos, cruzando así la barrera hematoencefálica, en un proceso denominado eliminación transvascular. No obstante, se desconocía si los vasos linfáticos meníngeos también participaban en la eliminación de desechos.

El equipo de Da Mesquita destruyó los vasos linfáticos meníngeos de ratones inyectando en la cisterna magna (un gran espacio lleno de LCR en las meninges) un producto que daña los vasos. Después administraron en ella un marcador fluorescente. En los ratones que carecían de vasos linfáticos meníngeos, el marcador no llegó a los ganglios linfáticos cervicales profundos, en los que drenan los vasos

linfáticos meníngeos en condiciones normales. Del mismo modo, la inyección de marcadores en el parénquima cerebral puso de manifiesto una disminución del drenaje del líquido intersticial en los ganglios cervicales profundos. Estudios anteriores habían demostrado que, tras la inyección en el LCR de elevadas concentraciones de marcador, este se difunde por el cerebro al lado de los vasos sanguíneos. Pero dicho transporte también se redujo en el mencionado experimento. Los autores confirmaron estos resultados mediante varias estrategias: empleo de diferentes marcadores; cierre quirúrgico del drenaje de los ganglios linfáticos cervicales profundos; y examen de ratones genomanipulados para alterar el desarrollo de los vasos linfáticos.

La destrucción de los linfáticos meníngeos también dio lugar a deficiencias en la orientación espacial y la memoria del miedo. El hipocampo desempeña un papel fundamental en estos comportamientos, y los investigadores hallaron en esta región alteraciones de la expresión génica similares a las observadas en los trastornos neurodegenerativos. En conjunto, estos experimentos indican que, para una adecuada actividad cognitiva, se precisa el drenaje del líquido intersticial cerebral y del LCR por los vasos linfáticos meníngeos.

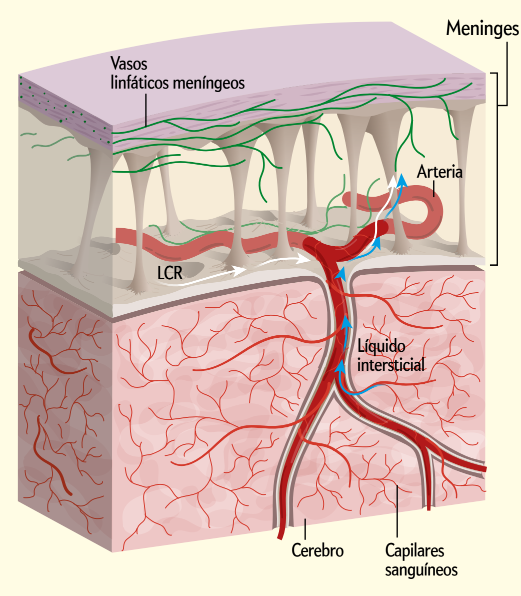
Estos hallazgos también plantearon una interesante pregunta: ¿a dónde van los marcadores inyectados? Un estudio ha descubierto que en la cisterna magna son transportados principalmente a la sangre y, de manera secundaria, al sistema linfático. La determinación simultánea de los movimientos del marcador en los linfáticos meníngeos, en otros vasos linfáticos (como los del cuello) y en la sangre podría revelar si la alteración de los vasos linfáticos meníngeos modifica las vías de control de la proteostasis cerebral y, como consecuencia, aumenta la eliminación transvascular de productos de desecho a través de la barrera hematoencefálica o su drenaje al sistema venoso en las meninges.

Depuración deficiente en el alzhéimer

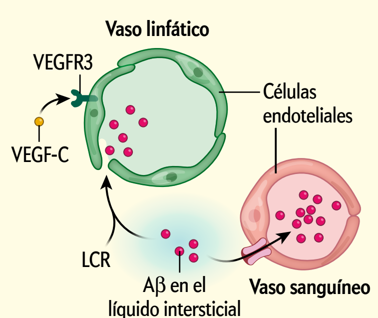
Da Mesquita y sus colaboradores observaron después que el diámetro y la cobertura de los vasos linfáticos meníngeos disminuyen con el envejecimiento, al tiempo que se reduce el drenaje de los marcadores desde los líquidos intersticial y cefalorraquídeo hasta los ganglios cervicales profundos. En el ratón, una vía de transmisión de señales en la que interviene el factor de crecimiento endotelial vascular C (VEGF-C) y su receptor VEGFR3 estimula la proliferación de los vasos linfáticos, mientras que las alteraciones de dicha vía dan lugar a una reducción de los linfáticos meníngeos. Por otra parte, el tratamiento con VEGF-C

DESHACERSE DE LAS SUSTANCIAS DAÑINAS

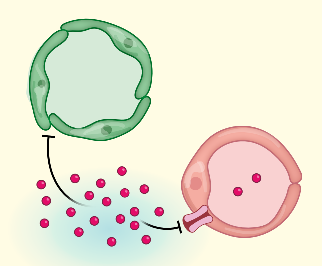
EL ENCÉFALO no posee vasos linfáticos propios para eliminar los residuos. En su lugar, se vale de un mecanismo especial que tiene lugar principalmente en el espacio que hay entre la meninges. Algunas enfermedades, como el alzhéimer, podrían aparecer debido a un fallo en este mecanismo.



Desde el líquido intersticial encefálico, las proteínas y desechos son transportados al lado de las paredes de los vasos sanguíneos hasta alcanzar el líquido cefalorraquídeo (LCR), en un espacio en las meninges (las membranas que recubren el sistema nervioso central). Se ha descubierto que los vasos linfáticos meníngeos drenan los líquidos cefalorraquídeo e intersticial, que contienen productos de desecho.



Sistema vascular intacto
En el cerebro de ratón sano, el drenaje linfático de ambos líquidos precisa la transmisión de señales entre el factor de crecimiento endotelial vascular C (VEGF-C) y su receptor VEGFR3 sobre las células endoteliales linfáticas que revisten la pared de los vasos linfáticos meníngeos. La proteína amiloide β (Aβ), asociada a la enfermedad de Alzheimer, se elimina del líquido intersticial principalmente por los vasos sanguíneos.



Sistema vascular alterado
Durante el envejecimiento pueden alterarse ambos sistemas vasculares. El diámetro de los vasos linfáticos meníngeos se reduce, lo que disminuye la eliminación de desechos por esta vía. Esta anomalía, junto con la menor eliminación por los vasos sanguíneos, conduce a la acumulación de Aβ en el cerebro.

© NATURE

aumenta el diámetro de los vasos linfáticos meníngeos, lo que favorece el drenaje linfático. En consonancia con estos hallazgos, los autores demostraron que la administración local del gen *Vegf-c* en la cisterna magna de ratones viejos mediante un virus restableció el drenaje del marcador del LCR a los ganglios linfáticos cervicales profundos. Este cambio trajo consigo la recuperación de la orientación espacial de los ratones viejos.

Las alteraciones seniles de la eliminación transvascular de desechos se han relacionado con la acumulación de la proteína amiloide β en el encéfalo, una característica distintiva de la enfermedad de Alzheimer. Da Mesquita investigó los efectos de la extirpación de los linfáticos meníngeos en dos modelos de dicha enfermedad en ratones, en los que el amiloide β producido en las neuronas se segrega al líquido intersticial. Tras la extirpación linfática, se acumuló amiloide β en las meninges, se aceleró el depósito de esta proteína en el parénquima cerebral y se produjeron deficiencias cognitivas. Los autores también mostraron una acumulación de amiloide β en las meninges de personas con alzhéimer, lo que indica la posible importancia de estos hallazgos para el ser humano.

Conviene resaltar que, en los modelos de ratón, no se observaron anomalías estructurales o funcionales aparentes en los vasos linfáticos meníngeos cuando se hizo perceptible el depósito de amiloide β en el parénquima cerebral. La administración de *Vegf-c* mediante virus en ese momento no impidió las alteraciones cognitivas en estos modelos, lo que permite suponer que el depósito de amiloide β y las alteraciones cognitivas tempranas de estos animales se debieron a trastornos de otra vía de eliminación; lo más probable, la eliminación transvascular. Puesto que tal vía se deteriora gradualmente con la edad, el sistema linfático meníngeo quizá soporta una carga creciente. Si se alcanza el límite del sistema, el drenaje linfático de amiloide β y otras proteínas de los líquidos intersticial y cefalorraquídeo podría resultar dañado. Por tanto, la regulación de la proteostasis cerebral parece deberse a una relación dinámica entre los vasos linfáticos meníngeos y los vasos sanguíneos.

Los futuros estudios deben encaminarse a mejorar los conocimientos sobre las vías de eliminación de residuos del encéfalo, los mecanismos de drenaje de los líquidos intersticial y cefalorraquídeo en los vasos linfáticos meníngeos, y la forma de interactuar de estos vasos con los sanguíneos en la barrera hematoencefálica. Tales análisis abrirán nuevos caminos para investigar la cognición, la neurodegeneración y la enfermedad de Alzheimer. Da Mesquita y sus colaboradores han señalado que las estrategias que fomenten la proliferación local de vasos linfáticos podrían mejorar la eliminación por los linfáticos meníngeos, con lo que se podría reestablecer la proteostasis cerebral y reducir el depósito de amiloide β. Queda por determinar si los tratamientos dirigidos a los linfáticos meníngeos también mitigarán la disfunción senil de los vasos sanguíneos, y si la mayor eliminación en la barrera hematoencefálica mejorará la actividad de drenaje del sistema linfático.

Melanie D. Sweeney
y ***Berislav V. Zlokovic*** *investigan en el Departamento de Fisiología y Neurociencia del Instituto Zilkha de Neurogenética, Facultad de Medicina Keck, Universidad del Sur de California, Los Ángeles.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 560, págs. 172-174, 2018.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels. Antoine Louveau et al. en *Nature*, vol. 523, págs. 337-341, julio de 2015.
Functional aspects of meningeal lymphatics in ageing and Alzheimer's disease. Sandro Da Mesquita et al. en *Nature*, vol. 560, págs. 185-191, julio de 2018.
Blood–brain barrier breakdown in Alzheimer disease and other neurodegenerative disorders. Melanie D. Sweeney, Abhay P. Sagare y Berislav V. Zlokovic en *Nature Reviews Neurology*, vol. 14, págs. 133-150, enero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Drenaje cerebral. Maiken Nedergaard y Steven A. Goldman en *IyC*, mayo de 2016.

SISTEMAS COMPLEJOS

Renormalización en redes complejas

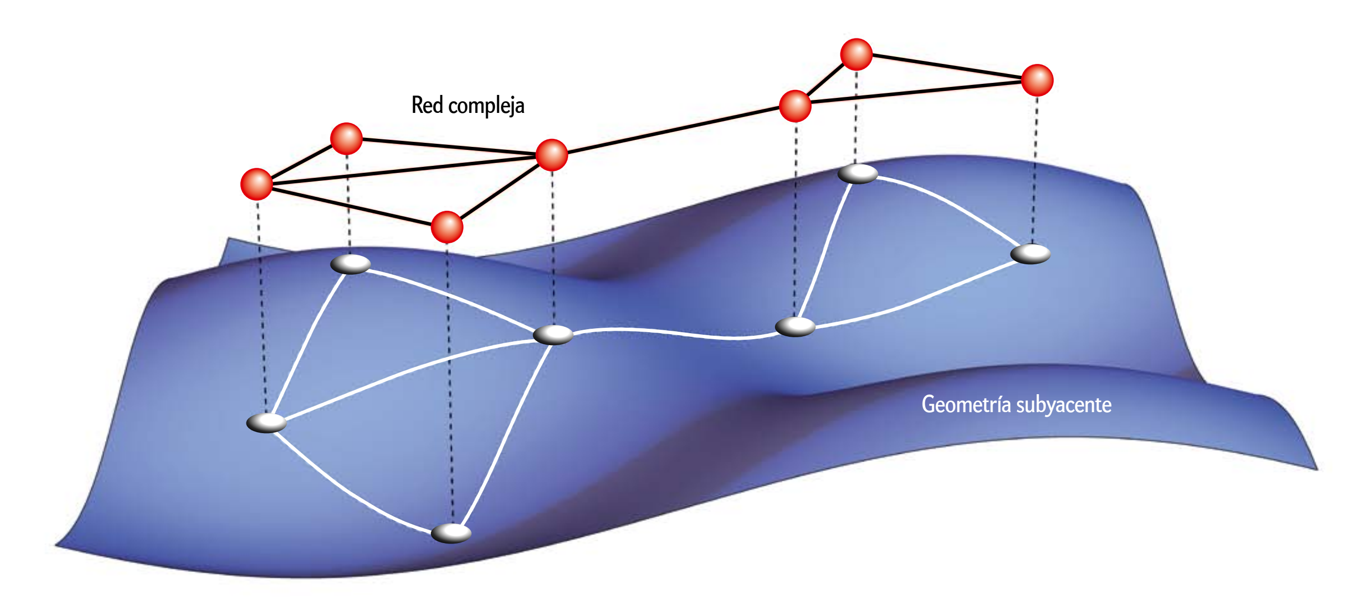
Las redes complejas permiten analizar problemas en tecnología, biología, sociología y otros ámbitos. Una técnica heredada de la física estadística permite estudiar su comportamiento a distintas escalas

M. ÁNGELES SERRANO

De los quarks a los supercúmulos de galaxias, la materia en el universo se organiza en estructuras con tamaños dispares. No obstante, aquellos fenómenos que ocurren en escalas muy distintas suelen poder tratarse de forma independiente. Ello supone una enorme ventaja, ya que nos permite entender numerosos aspectos de la realidad sin necesidad de tener en cuenta todos los detalles. Por ejemplo, no estamos obligados a conocer la teoría cuántica y la posición exacta de todos los átomos de la Tierra para predecir su órbita alrededor del Sol.

Sin embargo, en la naturaleza existe toda una clase de sistemas en los que intervienen de manera simultánea fenómenos que ocurren a escalas muy diferentes. Un ejemplo lo hallamos en la economía de un mundo globalizado, en la que las causas y los efectos de una crisis pueden afectar tanto a países y mercados como a trabajadores y consumidores. En estos casos, los cambios a nivel «microscópico», o local, pueden impulsar efectos a nivel global, y viceversa. Tales propiedades complican enormemente la comprensión y control de estos sistemas.

En física, este fenómeno se conoce desde hace tiempo. Aparece en ciertas



DE LA TOPOLOGÍA A LA GEOMETRÍA: Una red compleja (*arriba*) está definida por sus propiedades topológicas; es decir, por el número de nodos (*rojo*) y por cuáles de ellos se hallan conectados entre sí (*negro*). Sin embargo, sus propiedades estructurales pueden derivarse a partir de una representación geométrica (*abajo*): una superficie en la que la noción de distancia entre puntos se encuentra bien definida. Esta idea ha dado pie a un formalismo que permite analizar el comportamiento de la red a todas las escalas.

transiciones de fase, el proceso que tiene lugar cuando las propiedades macroscópicas de un sistema cambian de manera abrupta (como cuando el agua se congela a cero grados). Algunos ejemplos relevantes son la imantación «espontánea» o la aparición de la superconductividad cuando un material se enfría por debajo de cierta temperatura. En estos casos, la física del sistema queda determinada por procesos que afectan de manera simultánea a todas las escalas de longitud, desde el nivel atómico hasta el macroscópico.

Por fortuna, hace decenios que disponemos de un método general que permite relacionar las propiedades de un sistema físico a distintas escalas. Dicha técnica se conoce como grupo de renormalización. En los años setenta del siglo pasado, el físico de la Universidad de Chicago Leo Kadanoff fue el primero en entender que cada escala de longitud podía tener asociada una teoría, y que las teorías relevantes al nivel macroscópico debían poder deducirse a partir de aquellas que rigen en escalas menores. Poco después, Kenneth Wilson, físico de partículas de la Universidad Cornell y conocedor de las antiguas técnicas de renormalización en teoría cuántica de campos, incorporó esas ideas a la formulación moderna del grupo de renormalización, propuesta en 1971. Por su aplicación a la teoría de los fenómenos críticos, Wilson recibiría el premio Nobel de física en 1982.

No obstante, y a pesar del éxito del grupo de renormalización, hay una clase de sistemas que ha presentado una fuerte resistencia a dejarse tratar mediante estas técnicas. Son aquellos que quedan descritos por redes complejas, como las que representan las neuronas y sus conexiones o los países y sus relaciones comerciales. En ellos, el problema radica en que no es sencillo definir una noción de distancia que permita separar las distintas escalas que intervienen en el problema.

En un trabajo publicado hace poco en *Nature Physics* junto con Guillermo García-Pérez y Marián Boguñá, de la Universidad de Barcelona, hemos propuesto un nuevo marco para tratar redes complejas que sí permite aplicar las herramientas del grupo de renormalización. Dicho esquema se basa en pasar de la red original a una representación geométrica equivalente, en la que la noción de distancia sí se halla bien definida. Sus posibles aplicaciones van desde la posibilidad de construir versiones reducidas de redes que de otro modo resultarían inmanejables en términos de simulación computacional, como Internet, hasta mejorar los protocolos de navegación a través de una red.

La distancia en redes complejas

Las redes complejas aparecen en una gran variedad de ámbitos, desde la tecnología y la biología hasta la sociología y la física. En todos ellos, sus elementos e interacciones (como los países y sus relaciones comerciales) pueden representarse mediante un grafo formado por nodos (los países) y enlaces (dos países quedan conectados si y solo si comercian entre ellos).

Con frecuencia, las redes del mundo real presentan una serie de propiedades peculiares. Una de ellas es que, en general, el número de enlaces que hay que recorrer para llegar de un nodo a otro es mucho menor de lo que podríamos pensar en un principio. Esta propiedad recibe el nombre de «mundo pequeño», y es la que da lugar al fenómeno conocido como «seis grados de separación»: el hecho de que dos personas cualesquiera del mundo se hallan conectadas, como mucho, por una cadena de seis conocidos.

Fue precisamente esa propiedad de mundo pequeño la que, durante años, imposibilitó separar las diferentes escalas que concurren en la estructura de las redes complejas. Algunos intentos de aplicar el grupo de renormalización a estas redes se basaron en la idea de agrupar nodos en grupos cada vez mayores, según las distancias definidas por los enlaces. Sin embargo, pese a obtener resultados muy valiosos relativos al carácter fractal de las redes reales, estos métodos no permitieron desarrollar de manera apropiada una teoría de la renormalización.

Geometría oculta

No obstante, existe un marco más conveniente para definir distancias en redes complejas: asociar a una red un «espacio

GUILLERMO GARCÍA PÉREZ, MARIÁN BOGUÑÁ Y M. ÁNGELES SERRANO

métrico oculto»; es decir, una geometría equivalente en la que la noción de distancia se encuentra bien definida.

En 2008, junto con Boguñá y Dimitri Krioukov, por entonces en la Universidad de California en San Diego, propusimos la posibilidad de asociar a cada red compleja un espacio métrico subyacente que reflejase sus propiedades principales. Un año más tarde, Boguñá, Krioukov y otros investigadores demostraron que la geometría efectiva asociada a una red compleja es la geometría hiperbólica (la misma que presenta, por ejemplo, una silla de montar a caballo). Estas representaciones geométricas han demostrado su capacidad para revelar los aspectos estructurales de una red y, al mismo tiempo, han propiciado la aplicación de un riguroso programa de renormalización.

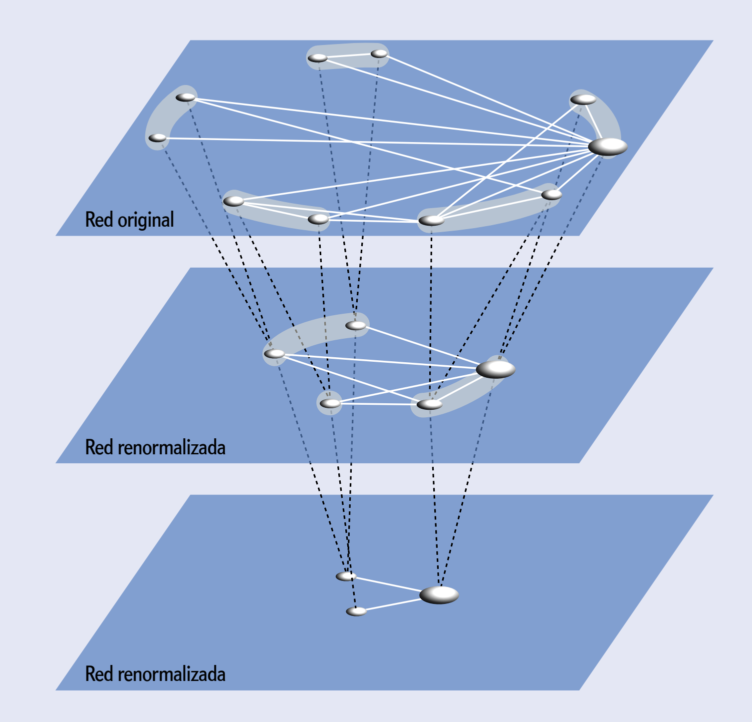
La técnica de renormalización se basa en «promediar» de manera progresiva las conexiones de corto alcance de una red a fin de elucidar sus interacciones a larga distancia. Para ello, primero se forman grupos de nodos similares, donde la noción de «similitud» se define a partir de las distancias que separan los nodos en el espacio métrico oculto. Después, dichos grupos de nodos se conectan de nuevo entre sí para obtener una versión renormalizada de la red original. Al repetir este procedimiento, podemos obtener una red mucho menor que la original pero con esencialmente las mismas propiedades estructurales.

En nuestro trabajo aplicamos esta noción del grupo de renormalización a varias redes reales y de apariencia muy diversa: Internet, la red mundial de aeropuertos, el proteoma humano, las conexiones entre palabras existentes en *El origen de las especies* de Darwin, el sistema de correo de una empresa, la red metabólica celular en humanos y una sección de la corteza visual de la mosca *Drosophila melanogaster*. En todos los casos, hallamos que las redes renormalizadas eran similares a la original. De la misma forma que ocurre con los fractales, en las distintas escalas de resolución aparecían patrones semejantes. Por tanto, las redes reales presentan invariancia de escala en muchas de sus propiedades estructurales.

Esta observación empírica corresponde además a una predicción del modelo geométrico, que relaciona la estructura de estas redes con espacios métricos ocultos. Al igual que ocurre con las redes reales, las redes sintéticas derivadas del modelo resultan equivalentes desde el punto de vista estadístico. Esto es una consecuencia directa de la invariancia bajo el proceso de renormalización de la ley que define la probabilidad de conexión entre pares de nodos. (De la misma manera que, en física estadística, la cantidad matemática asociada a la energía de un sistema mantiene la misma forma en el proceso de renormalización.)

DE LA FÍSICA ESTADÍSTICA A LA TEORÍA DE REDES

EL GRUPO DE RENORMALIZACIÓN es una técnica matemática que permite relacionar de manera rigurosa los procesos que tienen lugar a las distintas escalas de un sistema físico. Dicha técnica constituye desde hace años una piedra angular en física estadística, donde permite describir ciertas transiciones de fase (el cambio en las propiedades macroscópicas de un material inducido por sus interacciones a escala atómica) y en física de partículas, al relacionar los procesos que ocurren a alta y baja energía. Ahora, un trabajo reciente ha hallado la manera de aplicar el mismo formalismo a las redes complejas.



En una red compleja, el proceso de renormalización toma la red original (*arriba*) y agrupa nodos con propiedades similares (*gris*) en «nodos renormalizados»; después, estos vuelven a conectarse entre sí (*centro*). Al iterar el proceso, puede obtenerse una red mucho menor que la original (*abajo*) pero con las mismas propiedades estructurales básicas. Esta idea permite analizar las interacciones entre nodos a distintas escalas, así como trabajar con versiones reducidas —y, por tanto, mucho más manejables— de la red original.

ADAPTADO DE: «MULTISCALE UNFOLDING OF REAL COMPLEX NETWORKS BY GEOMETRIC RENORMALIZATION»; GUILLERMO GARCÍA-PÉREZ, MARIÁN BOGUÑÁ Y M. ÁNGELES SERRANO EN *NATURE PHYSICS*, VOL. 14, PÁGS. 583-589, JUNIO DE 2018

Aplicaciones y nuevos retos

La potencia del grupo de renormalización en redes complejas se pone de manifiesto también desde un punto de vista práctico. Dos de sus principales aplicaciones estriban en la posibilidad de trabajar con redes de escala reducida y en mejorar la eficiencia de los protocolos de navegación; es decir, la manera de moverse a lo largo de los nodos de la red.

A la hora de trabajar con grandes sistemas en red, la simulación de numerosos procesos resulta muy costosa en términos computacionales. Así ocurre con los protocolos de enrutamiento en Internet (el problema de hallar el camino más eficiente entre dos nodos). En estos casos, una alternativa es usar reproducciones a escala reducida de la red original como banco de pruebas. Al explotar la propiedad de autosemejanza a diferentes resoluciones, el grupo de renormalización puede ayudar a optimizar de manera notable los recursos computacionales necesarios.

Por otro lado, los mapas hiperbólicos posibilitan navegar en redes complejas mediante «protocolos descentralizados»: ya no es necesario conocer los caminos óptimos entre todos los pares de nodos para moverse de manera eficiente por la red, sino que pueden emplearse procesos basados en información local. Estos protocolos pueden mejorarse en todas las redes gracias a un algoritmo de navegación que aprovecha los mapas sucesivos que obtenemos al renormalizar.

En definitiva, el grupo de renormalización promete convertirse en una herramienta muy útil para revelar la estructura que exhiben las redes complejas a diferentes escalas. Con todo, aún nos enfrentamos a un número de problemas teóricos y prácticos. Algunos de ellos son la definición rigurosa de «clases de universalidad» en estas redes (un concepto que en física estadística permite agrupar materiales muy distintos en unas pocas categorías fundamentales según su comportamiento durante una transición de fase) o la incorporación de esta nueva perspectiva a los procesos dinámicos (como la adición de nuevos nodos) que pueden tener lugar en redes complejas.

M. Ángeles Serrano *es investigadora ICREA en el Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Barcelona y en el Instituto de Sistemas Complejos (UBICS), de la misma universidad.*

PARA SABER MÁS

Self-similarity of complex networks and hidden metric spaces. M. Ángeles Serrano, Dmitri Krioukov y Marián Boguñá en *Physical Review Letters*, vol. 100, art. n.º 078701, febrero de 2008.

Curvature and temperature of complex networks. Dmitri Krioukov et al. en *Physical Review E*, vol. 80, art. 035101(R), septiembre de 2009.

Multiscale unfolding of real complex networks by geometric renormalization. Guillermo García-Pérez, Marián Boguñá y M. Ángeles Serrano en *Nature Physics*, vol. 14, págs. 583-589, junio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Problemas físicos con muchas escalas de longitud. Kenneth G. Wilson en *IyC*, octubre de 1979. Reeditado para «Grandes ideas de la física», colección *Temas* de *IyC*, n.º 80, 2015.

La ciencia de redes cumple 20 años. Alessandro Vespignani en *IyC*, diciembre de 2018.



La mayor red de blogs de investigadores científicos



Neurociencia computacional
Inteligencia artificial para la psicología y la neurociencia
Carlos Pelta
Universidad Complutense de Madrid



Meteoritos y ciencias planetarias
Historias sobre meteoritos
J. M. Trigo-Rodríguez
Instituto de Ciencias del Espacio - CSIC



La bitácora del Beagle
Avances en neurobiología
Julio Rodríguez
Universidad de Santiago de Compostela



Arida cutis
Ecología de las zonas áridas
Fernando T. Maestre y Santiago Soliveres
Universidad Rey Juan Carlos y Universidad de Berna



La ciencia y la ley en acción
Las fronteras entre la ciencia y la ley
José Ramón Bertomeu Sánchez
Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero



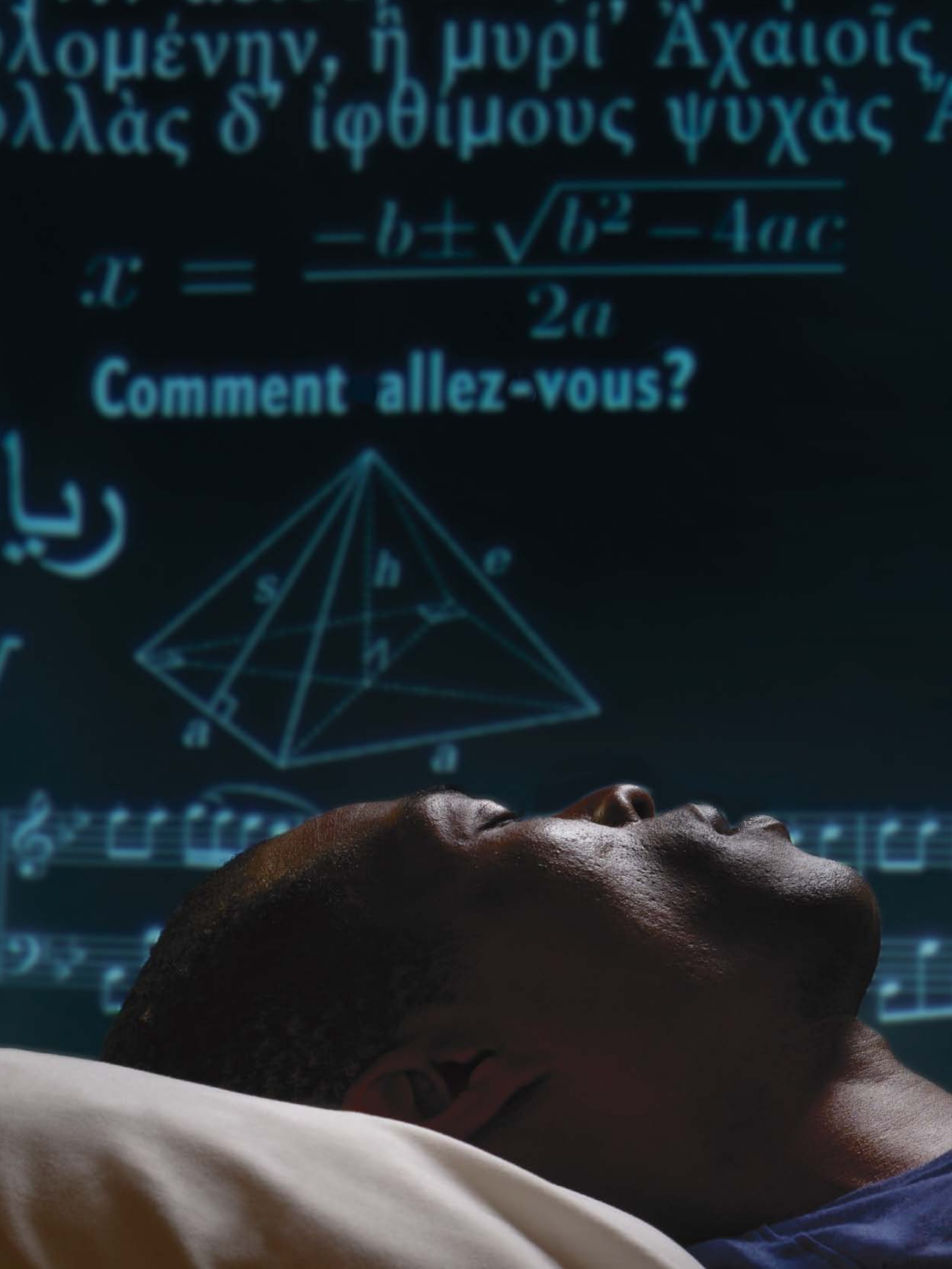
Homo nanus
Una visión del futuro desde la nanotecnología
Alberto Luis D'Andrea
Universidad de Buenos Aires

Y muchos más...

¿Eres investigador y te gustaría unirte a SciLogs? Envía tu propuesta a redaccion@investigacionyciencia.es

www.scilogs.es




ἣ μυρί' Ἀχαιοῖς
δ' ἰφθίμους ψυχὰς
$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$
Comment allez-vous?
s
h
e
a
a

NEUROCIENCIA

DESPIERTA LA HIPNOPEDIA

Las técnicas experimentales demuestran que es posible fortalecer la memoria durante el sueño

Ken A. Paller y Delphine Oudiette

Fotografía de Hannah Whitaker



Ken A. Paller es catedrático de psicología y director del programa de neurociencia cognitiva en la Universidad del Noroeste de Estados Unidos. La Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. ha financiado sus últimas investigaciones sobre la reactivación selectiva de recuerdos.

Delphine Oudiette es investigadora titular del Instituto de Salud e Investigación Médica en el Instituto del Cerebro y de la Médula Espinal, y en la unidad de Trastornos del Sueño ubicada en el Hospital Universitario Pitié-Salpêtrière, ambos en París.



EN LA NOVELA *UN MUNDO FELIZ*, UN CHICO MEMORIZA CADA PALABRA de una conferencia en inglés, lengua que no habla. El aprendizaje ocurre mientras duerme y oye una reproducción de la charla. Al despertar, es capaz de repetir la conferencia completa. A raíz de este descubrimiento, las autoridades totalitarias del mundo distópico de Aldous Huxley adaptan el método para dar forma a la mente inconsciente de los ciudadanos.

La hipnopedia (el aprendizaje durante el sueño) aparece en la literatura, en la cultura pop y en la sabiduría popular. Tomemos al protagonista de la serie animada infantil *El laboratorio de Dexter*, quien, en un episodio, dedica el rato de los deberes a idear un artilugio con el que aprende francés en una noche. A la mañana siguiente, Dexter se siente incapaz de hablar nada que no sea tal lengua. La idea de la hipnopedia no es una invención moderna, pues los budistas tibetanos llevan practicándola desde hace siglos como entrenamiento mental: con el susurro de un mensaje durante el sueño pretenden ayudar a que los monjes reconozcan como mera ilusión lo que les pasa durante el sueño.

Todos sabemos que aprendemos mejor cuando hemos descansado bien, pero la mayoría de la gente no valora lo más mínimo el aprendizaje durante el sueño. Ahora, una serie de nuevos hallazgos neurocientíficos complica este cuadro al demostrar que una parte crítica del aprendizaje ocurre mientras dormimos: los recuerdos recién formados resurgen durante la noche y esa reproducción ayuda a reforzarlos, lo que permitirá que retengamos al menos unos pocos durante toda la vida.

Algunos estudios han llegado a indagar si sería posible manipular el sueño para potenciar el aprendizaje. Revelan que el programa del sueño que consolida los recuerdos de la vigilia se refuerza con los sonidos y los olores. Los resultados obtenidos con roedores demuestran que existe una forma primitiva de implantación de recuerdos: mientras dormían, se recurrió a la estimulación eléctrica para enseñarles adónde debían acudir en la jaula al despertar. La versión de la hipnopedia imaginada por Huxley, con la que se asimilan textos enteros al pie de la letra durante la noche, sigue relegada a las páginas de su clásico de 1932. Pero los experimentos actuales indican que se pueden modificar los recuerdos mientras el individuo permanece inmerso en el abismo del sueño, lo que constituye los cimientos de una nueva ciencia, el aprendizaje durante el sueño.

EL PSICÓFONO

Para que estas técnicas surtan efecto, se ha investigado cómo se puede asimilar la información cuando la consciencia se encuentra sumida aparentemente en un descanso merecido. En los tiempos en que Huxley escribió *Un mundo feliz*, se había comenzado a explorar seriamente la posibilidad de inmiscuirse en el sueño. En 1927, el neoyorquino Alois B. Saliger inventó una «máquina automática de sugestión con control de tiempo», que comercializó como «Psicófono» y que reproducía durante la noche un mensaje grabado. El artefacto parecía evocar la tecnología imaginada por Huxley, salvo que era el usuario y no el Estado quien elegía el mensaje que se repetía.

A la invención de Saliger le siguieron en las dos décadas siguientes estudios que constataban ejemplos palpables de hipnopedia. En un artículo de 1942 de Lawrence LeShan, por entonces en la Universidad de William y Mary, se detallaba un experimento en el que visitó un campamento de verano donde muchos chicos tenían la manía de morderse las uñas. En un dor-

EN SÍNTESIS

El sueño siempre ha sido un misterio y la posibilidad de aprovecharlo para aprender ha estado desprestigiada durante mucho tiempo. Si el cerebro durmiente permanece apagado, el razonamiento desaparece y no es posible aprender.

Muy al contrario, el cerebro despliega gran actividad durante el sueño, de un modo que ayuda a fijar los recuerdos. De hecho, hallazgos recientes demuestran que se reactivan determinados recuerdos.

El control experimental de la reactivación de los recuerdos abre la puerta a la posibilidad de mejorar el aprendizaje durante el período nocturno de descanso.

Los estudios venideros en este campo tal vez examinen cómo favorecer la resolución de problemas durante el sueño, cómo eliminar las pesadillas o cómo, quizás algún día, acabaremos por controlar nuestros sueños.

mitorio ocupado por 20 de ellos, LeShan emplazó un fonógrafo portátil para reproducir mientras dormían una voz que repetía: «Las uñas son terriblemente amargas». Unos 150 minutos después de que cayeran dormidos, la frase se repetía 300 veces cada noche. El experimento duró 54 noches consecutivas, aunque una inoportuna avería del fonógrafo hizo que durante las últimas dos semanas fuera el propio LeShan quien repitiera la frase. Ocho de los 20 niños cesaron en su onicofagia, mientras que ninguno de la veintena que durmió sin la grabación lo hizo. Estos estudios pioneros no contemplaban el seguimiento fisiológico para verificar que los niños realmente estuvieran dormidos, por lo que los resultados no se consideran concluyentes.

Este campo recibió un duro revés en 1956, cuando dos científicos de la empresa RAND recurrieron al electroencefalograma (EEG) para grabar la actividad cerebral de los participantes de un estudio del sueño mientras se les leían 96 preguntas y respuestas (un ejemplo: «¿En qué tienda trabajaba Ulysses S. Grant antes de la guerra?»; respuesta: «En una ferretería»). Al día siguiente, se les recordaban las respuestas correctas de la información presentada en cuanto los durmientes mostraban signos de despertarse. Estos resultados provocaron un cambio de actitud en los interesados en el campo que persistió durante cincuenta años, a raíz de la paulatina pérdida de confianza en la viabilidad de la hipnopedia: los participantes en los experimentos parecían aprender solo si no estaban realmente dormidos cuando se les presentaba la información.

La mayoría de los científicos de esa época eluyó el tema del aprendizaje durante el sueño, si bien una minoría perseveró en la incógnita de si el sueño ayudaría a recordar la información nueva. En un protocolo de estudio típico se sondeó la posibilidad de que la privación del sueño durante una noche afectara a la memoria para aprender al día siguiente. En otro se planteaba si se recordaría mejor después de echar una siesta o de pasar el mismo lapso de tiempo despierto.

Diversos factores de confusión interfieren en ese tipo de estudios. Por ejemplo, el estrés generado por la privación del sueño merma las funciones cognitivas, lo que, a su vez, dificulta el recuerdo de lo memorizado. Al final, los neurocientíficos cognitivos comenzaron a abordar tales dificultades compilando los resultados de muchos métodos de investigación. Empezó a tomar cuerpo un sustancioso conjunto de pruebas que confirmaba que el sueño reactivaba los recuerdos adquiridos durante el día, lo que volvía a abrir el nexo entre el sueño y la memoria como un campo digno de estudio científico.

Numerosos investigadores que asumieron el reto escogieron el sueño de movimientos oculares rápidos (MOR, o REM en inglés), la fase en que los sueños son más frecuentes e intensos. Suponían que el procesamiento cerebral de los recuerdos durante la noche estaba ligado a los sueños, pero no se materializó ningún dato concluyente. En 1983, dos científicos de renombre, Graeme Mitchison y Francis Crick, ninguno de ellos psicólogo, fueron más allá y postularon que el sueño MOR era un medio para olvidar. En la misma línea, Giulio Tononi y Chiara Cirelli, ambos en la Universidad de Wisconsin-Madison, propusieron que el sueño podría corresponder al momento en que se debilitan las conexiones entre las neuronas del cerebro, lo que facilitaría la adquisición de información nueva al día siguiente.

En vez del sueño MOR, otros optaron por el de ondas lentas, una fase del sueño profundo sin movimientos rápidos de los ojos. En 2007, Björn Rasch, por entonces en la Universidad de Lübeck, y sus colaboradores prepararon a gente para un experimento que exigía que aprendieran la localización de una serie de objetos, al tiempo que olían el aroma de una rosa. Más tarde, en la cama del laboratorio, los participantes quedaron expuestos de nuevo al mismo olor en cuanto los registros eléctricos confirmaban la etapa del sueño deseada. El aroma activaba el hipocampo, una región del cerebro crítica para aprender a desenvolvernos en nuestro entorno y almacenar los conocimientos nuevos. Al despertar, recordaban las localizaciones con más exactitud, pero solo después de volver a sentir los olores que percibieron durante el sueño de ondas lentas (pero no el de MOR).

REACTIVACIÓN SELECTIVA DE LOS RECUERDOS

En 2009, nuestro laboratorio amplió esta metodología con el uso de sonidos en vez de olores. Hallamos que los sonidos reproducidos durante el sueño de ondas lentas hacían recordar mejor cada uno de los objetos que eligiéramos, en lugar de recordar la colección completa, como ocurría en el estudio con los olores. En nuestro procedimiento, denominado reactivación selectiva de recuerdos (RSR), primero le enseñábamos a la gente la localización de 50 objetos. Aprendían a colocar un gato en un punto designado de la pantalla de un ordenador, una tetera en otro, todo mientras oían el sonido pertinente (un maullido, un silbido para la tetera, etcétera).

Terminada esta fase de aprendizaje, los probandos se echaron una siesta en un rincón cómodo del laboratorio. Examinamos el trazado EEG suministrado por los electrodos adosados a la cabeza para verificar que dormían profundamente. Los trazados aportaron datos fascinantes sobre la actividad sincronizada de las redes neuronales en la capa externa del cerebro, la corteza, que son relevantes para la reactivación de los recuerdos [*véase el recuadro de la página siguiente*]. Cuando detectábamos el sueño de ondas lentas, reproducíamos el maullido, el silbido y los demás sonidos asociados a una parte de los objetos de la fase de aprendizaje. Se emitían a bajo volumen, no mucho más fuerte que el ruido de fondo, para no despertar a nadie.

Una vez despiertos, recordaban mejor la localización que se les apuntó durante el sueño que los lugares que no se habían señalado durante el experimento. Tanto los sonidos como los olores sirvieron de «chuleta» y desencadenaron aparentemente la reactivación de los recuerdos espaciales, con lo que se redujeron los olvidos.

En un principio, los procedimientos auditivos que usamos eran muy controvertidos. Entre los investigadores del sueño impera la opinión general de que la mayoría de los circuitos sensoriales de la corteza permanecen apagados durante el sueño, a excepción del sentido del olfato. No nos dejamos influir por esta visión ortodoxa, sino que dimos crédito a nuestro presentimiento de que la reproducción reiterada de los sonidos a un volumen bajo podría influir en el cerebro durmiente y alterar los recuerdos que se acabaran de memorizar.

De hecho, en numerosos estudios posteriores se han constatado los mismos beneficios mnémicos. Una técnica de diagnóstico por imágenes de resonancia magnética funcional ha puesto de relieve que ciertas regiones del cerebro intervienen en la RSR, y por su parte, los EEG han hecho aflorar la importancia de determinadas oscilaciones cerebrales. Dos artículos publicados el año pasado (uno por Scott Cairney, de la Universidad de York, y sus colaboradores; el otro de James Antony, de la Universidad de Princeton, y sus colaboradores) vinculan una oscilación, el huso del sueño, con los beneficios mnémicos de la RSR.

Además de potenciar los recuerdos espaciales, estos procedimientos también han contribuido a recordar mejor en otros contextos. La RSR ayudaría a dominar la interpretación de una

Los maestros del sueño

Una sinfonía compleja de actividad neuronal rige la conexión entre el sueño y la memoria

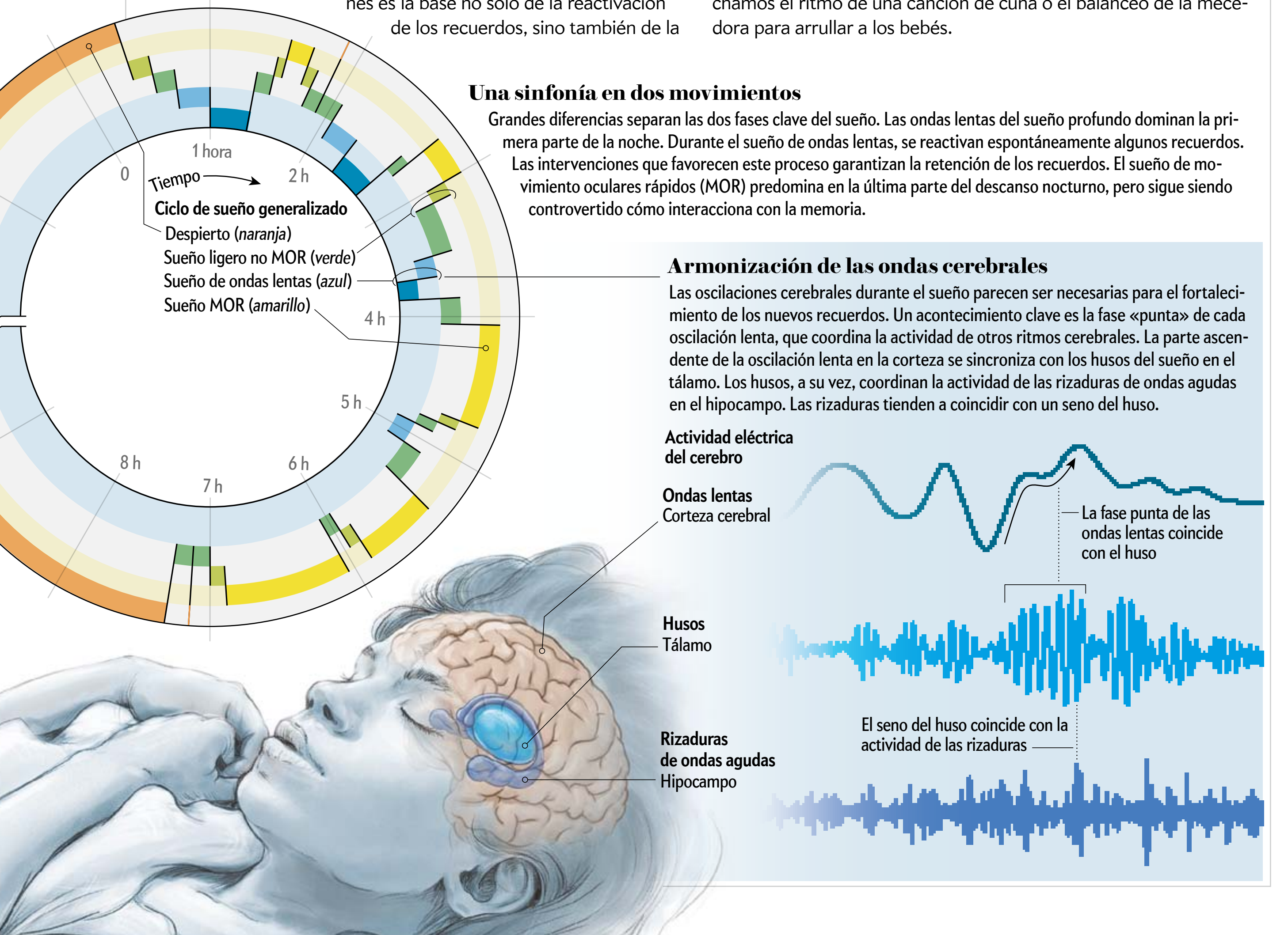
Los ritmos del cerebro ofrecen pistas para saber cómo ayuda el sueño a memorizar los recuerdos que serán recuperados más adelante. Un tipo de señal neuronal, llamada onda lenta, que se repite de 0,5 a cuatro veces por segundo, orquesta la actividad de las neuronas en la corteza cerebral. Cada oscilación lenta consta de una fase «valle», cuando las neuronas permanecen en silencio, y una fase «punta», cuando reanudan la actividad. Este perfil temporal ayuda a reforzar los recuerdos memorizados recientemente, pues garantiza que muchas regiones corticales permanezcan al mismo tiempo en estado punta.

La fase punta puede coincidir con husos del sueño, que son incrementos breves de un ritmo de 12 a 15 ciclos por segundo. Los husos se originan en el tálamo, que sirve de encrucijada para la información que se transmite a casi todas las partes de la corteza cerebral. Tienen un ritmo propio y recurrente a intervalos de unos cinco segundos. Coordinan la actividad de las rizaduras de ondas agudas en el hipocampo. Las rizaduras, por su parte, se producen a la vez que la reproducción de los recuerdos. Las ondas lentas, mientras tanto, asumen la función del director de orquesta: las oscilaciones que se miden en la corteza coordinan el ritmo de los husos del sueño y de las rizaduras de ondas agudas.

El acoplamiento intrincado de estas oscilaciones es la base no solo de la reactivación de los recuerdos, sino también de la alteración de las conexiones entre las neuronas para fortalecer la memorización de los recuerdos. Un diálogo entre el hipocampo y la corteza en el que intervienen todos los ritmos del cerebro desencadena una serie de interacciones de redes complejas. A lo largo de este proceso, conocido como consolidación, toda nueva información se integra con los recuerdos ya existentes. Además, la interconexión de los recuerdos permite extraer lo esencial de las experiencias recientes para dar sentido a un mundo complejo.

Los problemas de memoria suelen aparecer cuando este diálogo neuronal se trastoca. Los afectados por daños importantes en el hipocampo o en partes del tálamo podrían contraer una amnesia profunda. Sin las interacciones esperadas con estas regiones del cerebro durante el sueño y la vigilia, la corteza no almacena los registros mentales de los hechos y los acontecimientos conocidos como memorias declarativas. Además, podría darse una forma más leve de trastorno de la memoria cuando se interrumpe gravemente el procesamiento de los recuerdos durante el sueño.

A medida que mejore nuestro conocimiento sobre la orquestación fisiológica del cerebro durante el sueño, será posible adoptar nuevas estrategias que potencien los ritmos naturales del cerebro con distintas formas de estimulación eléctrica o sensorial. El ser humano siempre ha tenido esas inclinaciones, puesto que aprovechamos el ritmo de una canción de cuna o el balanceo de la mecedora para arrullar a los bebés.



Una sinfonía en dos movimientos

Grandes diferencias separan las dos fases clave del sueño. Las ondas lentas del sueño profundo dominan la primera parte de la noche. Durante el sueño de ondas lentas, se reactivan espontáneamente algunos recuerdos. Las intervenciones que favorecen este proceso garantizan la retención de los recuerdos. El sueño de movimiento oculares rápidos (MOR) predomina en la última parte del descanso nocturno, pero sigue siendo controvertido cómo interacciona con la memoria.

Armonización de las ondas cerebrales

Las oscilaciones cerebrales durante el sueño parecen ser necesarias para el fortalecimiento de los nuevos recuerdos. Un acontecimiento clave es la fase «punta» de cada oscilación lenta, que coordina la actividad de otros ritmos cerebrales. La parte ascendente de la oscilación lenta en la corteza se sincroniza con los husos del sueño en el tálamo. Los husos, a su vez, coordinan la actividad de las rizaduras de ondas agudas en el hipocampo. Las rizaduras tienden a coincidir con un seno del huso.

MESA SCHUMACHER

melodía al teclado y a aprender vocabulario nuevo o reglas gramaticales. La técnica también estimula los tipos de aprendizaje más sencillos, como los ajustes de la imagen del propio cuerpo. En experimentos de condicionamiento, la RSR altera el aprendizaje asimilado de una reacción automática ante un estímulo provocada por el emparejamiento de ese estímulo con una descarga eléctrica. Los estudios en curso están examinando otros tipos de recuerdo, como la asociación de los nombres con las caras cuando conocemos a la gente por primera vez.

A medida que la técnica evolucione será preciso analizar si la RSR podría servir para tratar trastornos, paliar adicciones o acelerar la recuperación tras una enfermedad. En nuestro laboratorio, en colaboración con el neurólogo Marc Slutzky, de la Universidad del Noroeste, estamos estudiando un nuevo método de rehabilitación con el que recuperar el movimiento de las extremidades después de un ictus. Una parte del tratamiento depende de los sonidos que hacen de apunte, que se reproducen durante el sueño con el fin de acelerar el reaprendizaje de los movimientos perdidos. Los estudios prospectivos parecen prometedores porque la RSR altera formas similares del aprendizaje motor en los individuos sanos.

Los futuros programas de hipnopedia podrían ayudar a conservar los recuerdos, a acelerar la adquisición de nuevos conocimientos, o incluso a corregir los malos hábitos, como el tabaquismo

¿Y LO DE APRENDER FRANCÉS?

Está probado que es posible reforzar los recuerdos, lo que nos hace plantearnos si sería posible introducir información nueva en el cerebro de una persona mientras duerme, una técnica que invoca el fantasma ético del control de la mente evocado en *Un mundo feliz*. ¿Sería, pues, ir demasiado lejos imaginar que nos puedan infundir recuerdos sin que nos demos cuenta?

Aunque la respuesta ortodoxa a tales conjeturas ha sido durante años una negativa tajante, los estudios de Anat Arzi, ahora en la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores demuestran que se pueden crear recuerdos relativamente simples mediante los olores. En un experimento, consiguieron paliar el ansia de fumar en quienes estaban intentando dejarlo. Mientras permanecían dormidos, los participantes quedaban expuestos a dos olores: humo de cigarrillo y pescado podrido. A la semana siguiente, los que habían olido la mezcla de ambos olores encendieron un 30 por ciento menos de cigarrillos, aparentemente por el condicionamiento de asociar el tabaco con el hedor a pescado.

La adquisición de un recuerdo más complejo no es tan fácil, pero podría resultar posible algún día. Karim Benchenane, del Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia, y sus colaboradores han mostrado cómo cambiar literalmente la mente, por ahora la de un ratón. Cuando comenzaron su trabajo, sabían que cuando un ratón explora un entorno nuevo, las neuronas denominadas células de lugar se activan a medida que el roedor pasa por partes concretas de un recinto. Estas mismas neuronas se excitan de nuevo durante el sueño, cuando parece que el recuerdo vuelve a reproducirse. Benchenane y su equipo estimularon el sistema de recompensa del cerebro del ratón (el fascículo prosencefálico interno) precisamente cuando las células de lugar se activaban espontáneamente durante el sueño. Comprobaron con asombro que los ratones acababan pasando más tiempo en los lugares que coincidían con la actividad de las células de lugar y que se dirigían hacia ahí directamente después de que despertasen. Serán precisos más experimentos para vislumbrar si a estos ratones se les implantan recuerdos falsos totalmente formados durante el sueño o si son guiados automáticamente a esos lugares por un proceso de condicionamiento, sin que sepan en absoluto qué es lo que los empuja allí.

Seguimos sin conocer los límites de lo posible, pero esta investigación ha confirmado la existencia de un componente normal del aprendizaje que funciona por su cuenta durante la noche. El sueño no solo es necesario para reponer energías y permanecer alerta al día siguiente, sino también para reforzar los recuerdos adquiridos durante la vigilia. Todavía hemos de aprender mucho sobre el procesamiento autónomo de la memoria. Los futuros trabajos deben revelarnos cómo ayuda el sueño a aprender y qué mecanismos cerebrales se ponen en marcha para conservar los recuerdos más valiosos. También resulta esencial que conozcamos mejor los peligros del sueño escaso o inadecuado, el cual se resiente por diversas formas de estrés vital, algunas enfermedades o el envejecimiento natural.

En un estudio dirigido por Carmen Westerberg, entonces en la Universidad del Noroeste, se apunta en la dirección deseada. Westerberg estudió pacientes con la alteración de la memoria que a menudo precede al alzhéimer: deterioro cognitivo leve con amnesia. Los resultados ilustran el vínculo entre el dormir poco y la reducción de la capacidad para recordar la información después de intercalar un retraso de una noche.

Todo este conocimiento podría ayudar a crear programas de hipnopedia destinados a conservar la memoria, acelerar la adquisición de nuevos conocimientos, o incluso corregir los malos hábitos, como el tabaquismo. Si miramos hacia un futuro más lejano, cabe la posibilidad de que acabemos sabiendo controlar los sueños, lo que abriría la puerta al tratamiento de las pesadillas, la resolución de problemas mientras dormimos, y quizás, hasta soñar viajes de recreo. En una cultura que ya ofrece el seguimiento del sueño desde la muñeca y los análisis genéticos por correo, podemos vislumbrar modos de convertir el tiempo de descanso en una tarea productiva, cosa que para algunos supondría un porvenir escalofriante y para otros una oportunidad bienvenida de piratear su yo.

PARA SABER MÁS

The secret world of sleep: The surprising science of the mind at rest. Penelope A. Lewis. Palgrave Macmillan, 2013.
Upgrading the sleeping brain with targeted memory reactivation. Delphine Oudiette y Ken A. Paller en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 13, n.º 3, págs 142-149; marzo de 2013.
Why we sleep: Unlocking the power of sleep and dreams. Matthew Walker. Scribner, 2017.
Sleeping in a brave new world: Opportunities for improving learning and clinical outcomes through targeted memory reactivation. Ken A. Paller en *Current Directions in Psychological Science*, vol. 26, n.º 6, págs. 532-537; diciembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los beneficios del sueño. Giulio Tononi y Chiara Cerelli en *IyC*, octubre de 2013.
Las funciones vitales del sueño. Robert Stickgold en *IyC*, diciembre de 2015.



COSMOLOGÍA

LAS PRIMERAS GALAXIAS DEL UNIVERSO

Un nuevo proyecto ha conseguido adentrarse en una de las épocas más desconocidas de la historia cósmica

Dan Coe

Dan Coe trabaja en el Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial, el centro de operaciones del telescopio Hubble, en Baltimore. Es el investigador principal del Sondeo con Cúmulos Lente para el Estudio de la Reionización (RELICS).



ESTAMOS A PUNTO DE

ESCRIBIR UNA HISTORIA CASI COMPLETA DEL COSMOS. Los astrónomos ya han observado galaxias pertenecientes a una época en la que el universo apenas tenía el 3 por ciento de su edad actual, estimada en unos 13.800 millones de años.

La luz de una de ellas, SPT0615-JD, comenzó su viaje hacia la Tierra hace 13.300 millones de años. En 2017 llegó al telescopio espacial Hubble, donde pudimos vislumbrarla en el marco de un proyecto llamado Sondeo con Cúmulos Lente para el Estudio de la Reionización (RELICS, por sus siglas en inglés), concebido para encontrar algunas de las primeras galaxias del universo. RELICS se desarrolló entre octubre de 2015 y octubre de 2017, y empleó más de 100 horas de tiempo de observación del Hubble y más de 900 del telescopio espacial Spitzer. La iniciativa reveló más de 300 posibles galaxias correspondientes a los primeros 1000 millones de años del cosmos.

Estos objetos resultan fascinantes, ya que nos permiten atisbar en un período de nuestro pasado aún desconocido. Al estudiarlos, esperamos aprender cómo se formaron las primeras galaxias y qué efecto ejercieron en el universo temprano. Creemos que las galaxias como SPT0615-JD transformaron el cosmos primitivo al inundarlo con luz ultravioleta, la cual fue absorbida por el hidrógeno gaseoso circundante y volvió a transformar los primeros átomos neutros del universo en protones y electrones aislados, un proceso conocido como «reionización». Sin embargo, los detalles sobre cómo y cuándo ocurrió dicho fenómeno siguen sin estar claros. Con suerte, eso cambiará pronto gracias a estos nuevos hallazgos.

LAS PRIMERAS GALAXIAS

Las galaxias primitivas diferían de las actuales. Eran mucho más «limpias», ya que se componían principalmente de hidrógeno y helio gaseoso. Con el tiempo, sus estrellas fueron fusionando esos átomos para formar elementos más pesados. Y, cuando aquellos astros murieron en violentas explosiones de supernova, dispersaron los elementos pesados por las galaxias, enriqueciéndolas con el material necesario para crear planetas y vida.

Las primeras galaxias aún tenían que evolucionar hasta dar lugar a las majestuosas estructuras espirales o elípticas que vemos hoy a nuestro alrededor. Eran más desordenadas y pequeñas, lo que hace que resulten mucho más difíciles de ver. Las más antiguas que hemos encontrado tenían el 1 por ciento del tamaño de la Vía Láctea. Sin embargo, crecían con rapidez, formando nuevas estrellas a un ritmo prodigioso. Por aquel entonces el combustible estelar abundaba: las galaxias primitivas estaban bañadas por frías corrientes de hidrógeno gaseoso que fluía hacia el interior, atraído por la gravedad. A menudo, las galaxias chocaban entre sí y se fusionaban, lo que aceleraba su

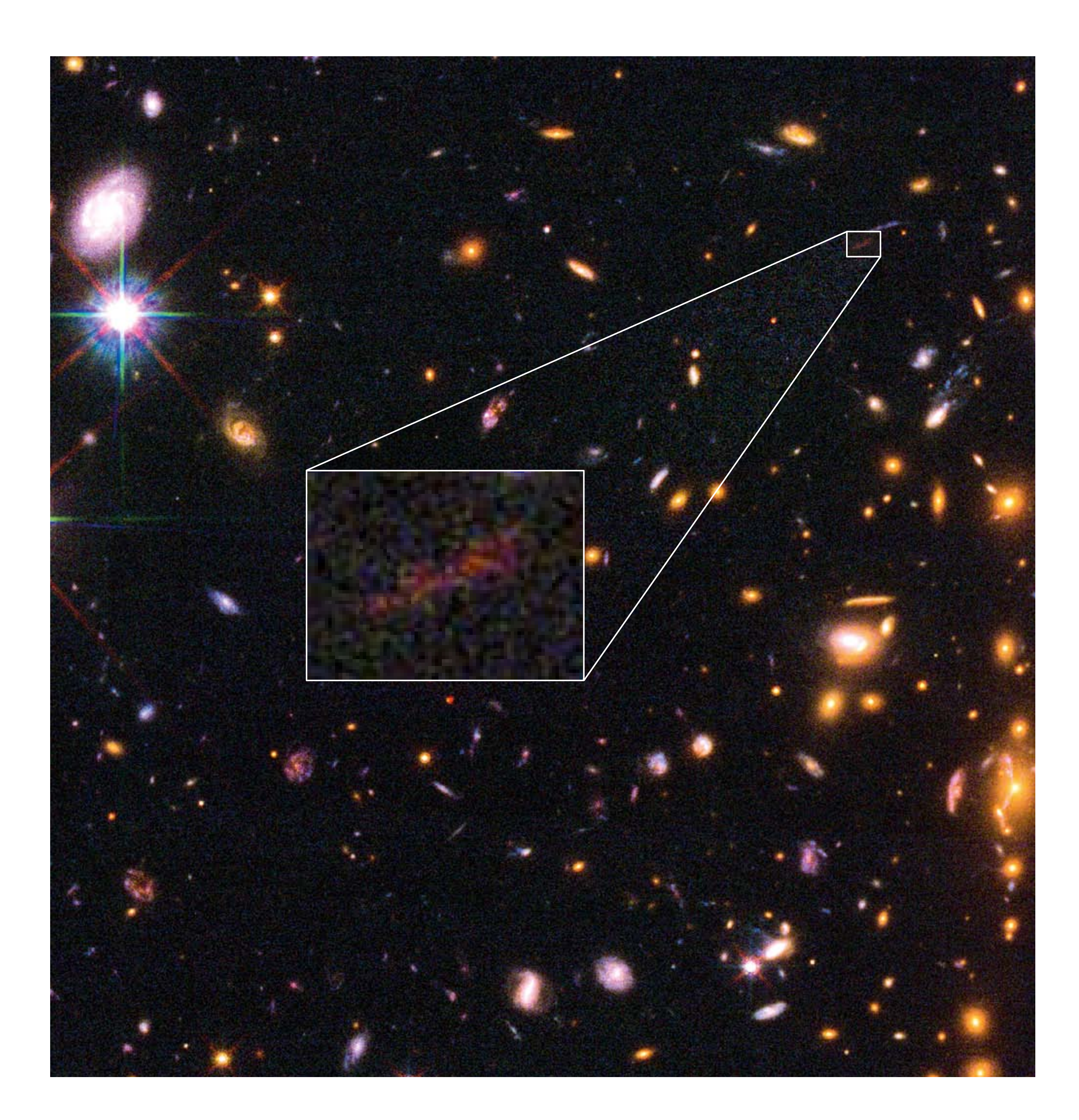
EN SÍNTESIS

Un experimento reciente, RELICS, fue concebido para encontrar algunas de las primeras galaxias del cosmos, correspondientes a una época muy poco conocida de la historia del universo.

El proyecto empleó lentes gravitatorias: cúmulos galácticos que curvan el espaciotiempo y que, a modo de lupa, amplifican la luz procedente de fuentes distantes.

La iniciativa ha descubierto más de 300 galaxias antiguas; entre ellas, una que data de cuando el universo solo tenía el 3,5 por ciento de su edad actual.

PÁGINAS ANTERIORES: RON MILLER



BORRÓN ROJO: Esta tenue mancha en una imagen del telescopio espacial Hubble corresponde a SPT0615-JD, una de las galaxias más antiguas conocidas.

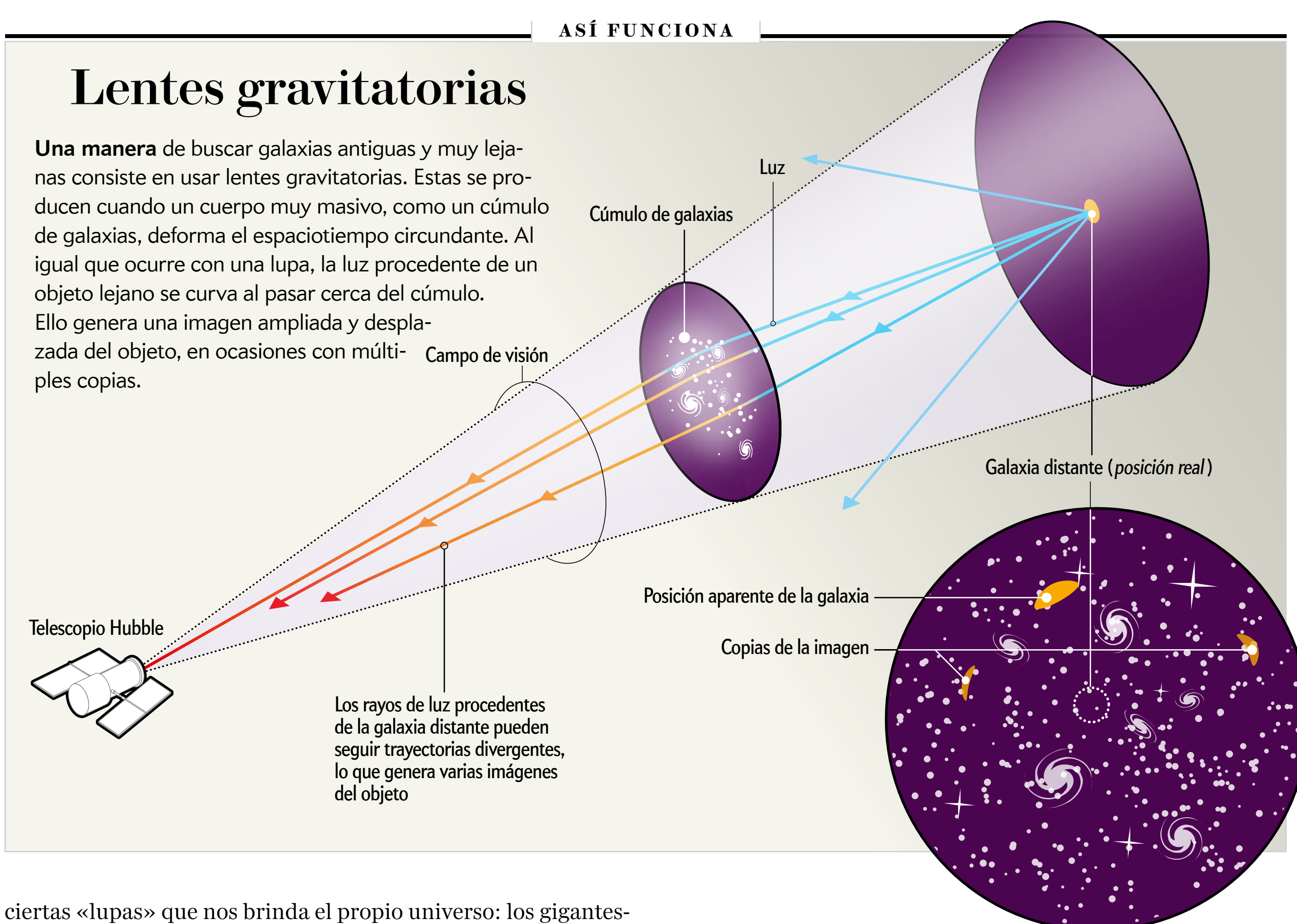
NASA, ESA, STSCI Y BRETT SALMON

crecimiento y desencadenaba nuevos brotes de formación estelar. A medida que el universo fue expandiéndose, el crecimiento de las galaxias se frenó, las fusiones importantes se hicieron menos frecuentes y el suministro de gas disminuyó.

Esta es la imagen básica que tenemos hoy de nuestra historia cósmica. Pero aún quedan numerosas preguntas por responder. ¿Cuándo se formaron las primeras galaxias? ¿Cuán pequeñas eran? ¿Qué aspecto tenían? ¿Fueron los «bloques de construcción» de las galaxias que vinieron después? ¿Eran todas ellas un hervidero de formación estelar, o hubo algunas más tranquilas, similares a las actuales? ¿Tuvieron tiempo de adoptar forma de disco, como la Vía Láctea, o se fusionaban con demasiada frecuencia para hacerlo? ¿Encontraremos alguna galaxia llena de hidrógeno y helio prístinos, o las primeras supernovas las enriquecieron con elementos pesados demasiado pronto? ¿Con qué rapidez aumentó el tamaño y el número de las primeras galaxias? ¿Fueron realmente ellas las responsables de reionizar el universo? Gracias a los resultados del proyecto RELICS, esperamos dar un paso más hacia la resolución de estas cuestiones.

LUPAS CÓSMICAS

Para vislumbrar el pasado remoto, RELICS usó una técnica conocida como lentes gravitatorias. Esta se basa en aprovechar



ciertas «lupas» que nos brinda el propio universo: los gigantescos cúmulos de galaxias. Estos poseen una masa tan descomunal que su gravedad curva de manera considerable el espaciotiempo circundante, tal y como predice la teoría de la relatividad general de Einstein. De esta manera, cuando la luz de un objeto más distante viaja hacia nosotros, esa curvatura del espacio puede actuar como una lente que amplifica la imagen del objeto en cuestión. Cuando su luz llega a la Tierra, el objeto aparece deformado y estirado, pudiendo observarse en ocasiones varias imágenes de él. Si este efecto le parece extraño, tal vez pueda contemplar algo similar cuando tome su próxima copa de vino. Si mira una vela encendida a través de la base de la copa, verá varias imágenes aumentadas de la llama.

Estas galaxias ampliadas son más brillantes y pueden resolverse con más detalle de lo normal, lo que permite estudiar mejor sus propiedades. Otra ventaja de observar regiones concretas del cielo a través de lentes gravitatorias reside en que podemos descubrir galaxias distantes de manera más eficiente que al estudiar zonas «vacías», como las estudiadas por las célebres imágenes de «campo profundo» del Hubble. Esto último no resulta obvio: la amplificación mediante lentes gravitatorias nos permite ver un mayor número de galaxias tenues; sin embargo, también focaliza una zona menor del cielo y, por tanto, con menos galaxias. ¿Qué efecto se impone? Las lentes gravitatorias salen victoriosas cuando el aumento revela un gran número de galaxias tenues. Y en el universo temprano abundaban las galaxias pequeñas y débiles, razón por la que detectaremos muchas más cuando busquemos en imágenes fuertemente amplificadas por los cúmulos de galaxias.

Tres de los mayores programas observacionales del Hubble de los últimos siete años han empleado cúmulos galácticos como lentes gravitatorias para buscar galaxias distantes. En estos sondeos también tomó parte el telescopio espacial Spitzer, que observa en el infrarrojo y a longitudes de onda mayores que el Hubble.

El primero, el Sondeo con Cúmulos Lente y Supernovas del Hubble (CLASH), fue un programa de tres años dirigido por Marc Postman, del Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial (STScI), en Baltimore, que estudió 25 cúmulos de galaxias. En él ayudé a escribir la propuesta y a analizar las imágenes, gracias a lo cual en 2012 descubrí MACS0647-JD, una galaxia observada tal y como era cuando el universo apenas contaba 420 millones de años. Esta era una seria candidata a la galaxia más distante conocida, tan solo superada en 2016, cuando Pascal Oesch, de Yale, descubrió una que databa de unos 20 millones de años antes, esta vez con el Sondeo Extragaláctico Profundo del Ensamblaje Cósmico en el Infrarrojo Cercano (CANDELS), una gran exploración de regiones del cielo relativamente vacías realizada con el Hubble, aunque sin la ayuda de lentes gravitatorias fuertes.

Tras los éxitos de CLASH, ayudé a convencer al entonces director del Hubble, Matt Mountain, para que incluyera los cúmulos de galaxias en el siguiente gran programa del telescopio, Campos Frontera del Hubble, liderado por Jennifer Lotz, del STScI. Este proyecto siguió los pasos de los programas de campo profundo, basados en observar pequeñas zonas del cielo durante muchos días. Aquellos sondeos previos estudiaron las regiones del cielo más vacías conocidas, sin galaxias cercanas y brillantes que dificultaran ver el universo más distante.

La primera imagen de este tipo, bautizada Campo Profundo del Hubble, combinó 342 exposiciones tomadas durante

diez días de 1995. Aquello supuso una auténtica revelación: en una pequeña porción de cielo, equivalente a la que abarca un grano de arena a un brazo de distancia, aparecieron unas 3000 galaxias. Los posteriores Campo Profundo Sur y Campo Ultraprofundo del Hubble tuvieron el mismo cuidado a la hora de evitar galaxias próximas. El proyecto Campos Frontera se atrevió a romper con esa tradición, al obtener imágenes profundas de seis regiones celestes que contenían algunas de las mayores concentraciones de galaxias a distancias de entre 3000 y 5000 millones de años luz. El proyecto también observó seis regiones sin apenas objetos cercanos, más a la usanza de los anteriores programas. Al incrementar la potencia de los telescopios Hubble y Spitzer mediante el uso de lentes gravitatorias, Campos Frontera reveló las galaxias distantes más pequeñas y tenues jamás observadas.

RELIQUIAS DEL PASADO

Después de CLASH y con el programa Campos Frontera en funcionamiento, la aprobación de otro gran sondeo de cúmulos de galaxias con el Hubble no estaba clara. Sin embargo, reparé en que había numerosos cúmulos masivos que nunca se habían observado en el infrarrojo cercano: justo las longitudes de onda en que aparecerían las galaxias distantes. Ello se debe a que, a medida que el universo se expande, la luz de los objetos lejanos se torna cada vez más rojiza.

Localicé esos cúmulos gracias a un catálogo elaborado en 2015 por el satélite Planck, de la Agencia Espacial Europea. Planck es célebre por sus detalladas imágenes del fondo cósmico de microondas; sin embargo, también logró censar más de mil cúmulos de galaxias. La mayoría de ellos ya se conocían, pero muchos otros no. Me percaté de que el cúmulo más masivo del catálogo, Abell 2163, solo había sido observado por el Hubble en la banda visible del espectro. El segundo más masivo, PLCK G287.0+32.9, uno de los hallazgos de Planck, había demostrado ser una magnífica lente en observaciones realizadas desde la superficie terrestre, pero el Hubble aún no lo había estudiado.

Compilé una lista de 41 cúmulos masivos para los que no existían imágenes del Hubble en el infrarrojo cercano, y reuní a un equipo de astrónomos para escribir una extensa propuesta para observarlos. Solicitamos usar el Hubble durante 190 de sus órbitas alrededor de la Tierra, lo que suponía más de 100 horas de observación, aproximadamente el 5 por ciento del tiempo disponible para las propuestas de aquel año. Una vez presentadas todas, astrónomos de todo el mundo se congregaron en Baltimore para deliberar sobre ellas. En junio de 2015 supimos que la nuestra había sido aceptada. Fue el mayor proyecto dentro del programa de observación general del vigesimotercer año de operaciones del Hubble.

Nuestro proyecto, RELICS, observó los 41 cúmulos con el canal infrarrojo de la Cámara de Campo Amplio (WFC3/IR) del Hubble. También estudiamos la luz visible correspondientes al rojo, el verde y el azul (si aún no se había observado) con la Cámara Avanzada para Exploraciones. Las imágenes de este instrumento, de mayor resolución, ayudan a medir las propiedades del cúmulo como lente gravitatoria y a estimar la amplificación de las galaxias distantes descubiertas en las imágenes del WFC3/IR. Observamos a siete longitudes de onda entre 0,4 y 1,7 micrómetros, lo que nos permitió separar la luz de cada galaxia en sus colores individuales. Al examinar características conocidas, como la longitud de onda concreta que absorbe el hidrógeno neutro, resulta posible calcular cuánto se ha desplazado al rojo la luz de una galaxia y, por tanto, a qué distancia se encuentra.

Al mismo tiempo, conseguimos 945 horas de observación con el telescopio Spitzer en propuestas lideradas por Maruša Bradač, de la Universidad de California en Davis, y con importantes contribuciones del director del Spitzer, Tom Soifer. Las longitudes de onda observadas por el Spitzer proporcionan un censo más completo de las estrellas en estas galaxias tempranas, lo que permite medir su masa estelar y determinar si realmente se encuentran tan lejos como parecen indicar las imágenes del Hubble.

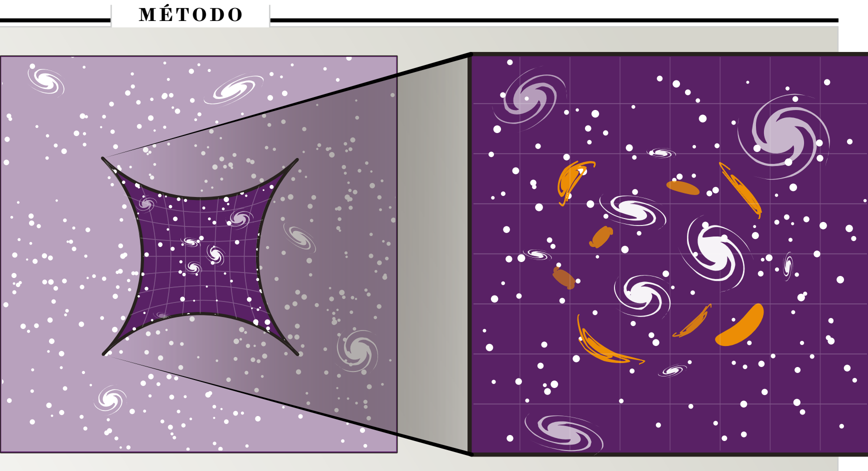
EL DESCUBRIMIENTO

La galaxia SPT0615-JD fue detectada en 2017 por el investigador posdoctoral Brett Salmon. Sin embargo, en un principio no emergió en las imágenes del Hubble como el extraordinario objeto que es. Una galaxia puede verse roja por distintos motivos. Algunas presentan un enorme desplazamiento al rojo, como SPT0615-JD. Otras están rodeadas de polvo, el cual absorbe la luz más azul y la reemite en forma de radiación infrarroja. Y otras simplemente son viejas: hace tiempo que no forman muchas estrellas nuevas, y los astros que les quedan son los más

MÉTODO

Dos estrategias

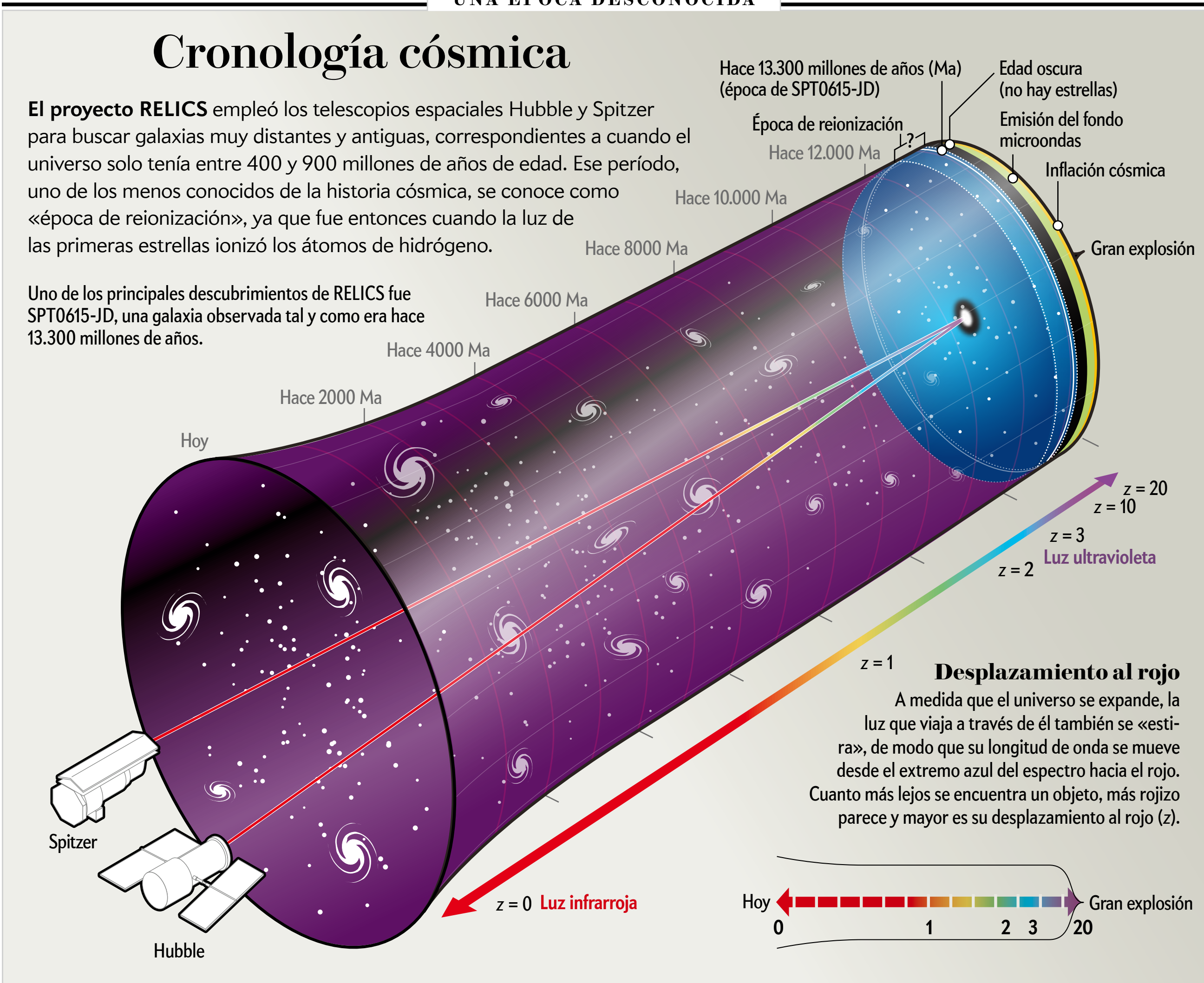
Existen dos métodos para buscar galaxias antiguas. Uno se basa en observar durante largo tiempo una región del cielo aparentemente vacía. Un proyecto reciente, RELICS, ha usado otra técnica: estudiar áreas ocupadas por un gran cúmulo de galaxias para aprovechar el efecto de lente gravitatoria. Esta estrategia ofrece un campo de visión menor (ya que la lente focaliza una zona pequeña), pero revela galaxias que de otro modo serían demasiado tenues para verlas.



Campo de visión «vacío»

Campo de visión amplificado

NIGEL HAWTIN



longevos y rojizos. Además, una misma galaxia puede también responder a una combinación de todos estos factores: distante, polvorienta y avejentada.

Las observaciones del Spitzer a longitudes de onda de entre 3 y 5 micrómetros son clave para distinguir galaxias distantes y muy desplazadas al rojo de otras más cercanas pero intrínsecamente rojas. De hecho, en las imágenes del Hubble descubrimos tres galaxias (entre ellas, SPT0615-JD) que parecían presentar un desplazamiento al rojo igual a 10; es decir, correspondiente a cuando el universo contaba menos de 500 millones de años. Los datos del Spitzer, sin embargo, revelaron que dos de ellas encajaban mejor con un desplazamiento al rojo de 2, cuando el universo ya tenía unos 3000 millones de años, una cuarta parte de su edad actual.

Al combinar el análisis efectuado por Salmon con los datos del Hubble más el realizado por Victoria Strait, de la Universidad de California en Davis, con los del Spitzer, descubrimos que la intensidad luminosa de SPT0615-JD caía bruscamente al llegar a los 1,34 micrómetros, sin signos de luz en longitudes de onda inferiores. Ello indicaba que esa radiación había sido absorbida por el hidrógeno gaseoso del universo joven, transformando sus átomos en iones. El corte abrupto en el espectro de SPT0615-JD reviste gran utilidad, puesto que nos permite determinar su distancia: aunque lo vemos a unos 1,34 micrómetros, sabemos que, en realidad, el hidrógeno neutro absorbe luz ultravioleta con longitudes de onda de 0,1216 micrómetros o menos. La diferencia entre esa cifra y el corte observado en el espectro de SPT0615-JD revela cuánto se ha desplazado al rojo su luz como consecuencia de la expansión cósmica y, por consiguiente, a qué distancia se halla la galaxia.

Un desplazamiento al rojo igual a 10 corresponde al momento en que el universo solo tenía el 3,5 por ciento de su edad actual. Esta datación convierte a SPT0615-JD en una de las galaxias más antiguas que conocemos. Sabemos de otras dos galaxias un poco más distantes, con un desplazamiento al rojo de 11, correspondiente a cuando el universo contaba 400 millones de años. Pero en las imágenes del Hubble esas galaxias solo aparecen como puntos infrarrojos, demasiado pequeños para resolver su estructura interna. SPT0615-JD es especial. Su imagen ha sido aumentada por una lente gravitatoria, lo que nos brinda la visión más detallada de una galaxia temprana.

Ahora, esperamos obtener nuevas imágenes del Hubble que nos permitan apreciar más pormenores de esta galaxia, así como observar sus múltiples copias más tenues que, en principio, debería producir la lente gravitatoria, tal y como ha predicho Rachel Paterno-Mahler, de la Universidad de California en

NIGEL HAWTIN

Irvine. También nos han aceptado un programa de observación con la batería de telescopios ALMA, en Chile, con la que esperamos confirmar nuestra medición de la distancia y descubrir la presencia de oxígeno, lo que supondría la detección más antigua de un elemento tan pesado. Por último, propondremos observaciones con el sucesor del Hubble, el telescopio espacial James Webb (JWST), de la NASA, a fin de obtener imágenes detalladas del interior de la galaxia, medir su contribución a la reionización y revelar su composición química, ya esté formada por hidrógeno y helio prístinos o enriquecida con elementos más pesados.

SPT0615-JD fue el descubrimiento más notable de RELICS. No obstante, hallamos también más de 300 galaxias que, aunque pendientes de confirmación, podrían datar de los primeros 1000 millones de años del universo. Entre ellas se encuentran las más brillantes que conocemos para estos tiempos remotos, lo que nos permitirá estudiarlas en profundidad. En un principio esto nos sorprendió, pues los telescopios terrestres ya habían observado un área del cielo muchas veces mayor. Sin embargo, tras hacer los cálculos, los resultados son los esperados: al usar el Hubble, el Spitzer y las ventajas que ofrecen las lentes gravitatorias, RELICS fue capaz de revelar galaxias más brillantes a esas distancias.

UNA LAGUNA EN NUESTRA HISTORIA

Las galaxias antiguas descubiertas por RELICS están ayudando a completar un capítulo ausente de los libros de historia del cosmos. Disponemos de una teoría básica sobre los primeros instantes, cuando la gran explosión dio comienzo al universo y el espacio se expandió con rapidez durante un período llamado inflación. Unos 380.000 años después del nacimiento del espacio y el tiempo, el universo se había enfriado lo suficiente para que se formaran los primeros átomos neutros y la luz viajara sin impedimentos. Hoy, vemos ese primer resplandor en forma del fondo cósmico de microondas.

Tras esa instantánea, hay una laguna de 400 millones de años en nuestro relato. Todavía no hemos observado ni un solo objeto tal y como era durante esa época. Ese 3 por ciento de la historia cósmica nos es desconocido. Pero sabemos que en él pasaron muchas cosas. Las primeras estrellas se formaron quizá 100 millones de años después de la gran explosión. Creemos que fue entonces cuando las estrellas comenzaron a agruparse hasta formar las primeras galaxias. Su luz impactó contra los átomos de hidrógeno, ionizándolos de nuevo y liberando sus electrones.

Comprender cómo ocurrió aquel proceso resulta fundamental para completar las páginas que faltan en la historia de nuestros orígenes. RELICS y los proyectos anteriores, como CLASH, CANDELS y Campos Frontera del Hubble, han hecho grandes progresos, pero esperamos avances aún más importantes cuando comience a operar el JWST. Este observatorio, cuyo lanzamiento está previsto para 2021, será la herramienta más potente que hayamos tenido nunca para estudiar los tiempos más remotos del universo. Al observar con un espejo mayor y a longitudes de onda más largas, podrá ver galaxias más lejanas y tenues con mayor resolución que cualquier observatorio anterior. Y debería ser capaz de determinar la masa y la composición de esas galaxias y cómo contribuyeron a la reionización.

Aunque las lentes gravitatorias ya han resultado de gran ayuda para descubrir galaxias distantes con los telescopios actuales, esperamos que supongan una ventaja aún más importante al estudiar mayores desplazamientos al rojo con el JWST. A medida que miramos atrás en el tiempo, encontramos que las galaxias más pequeñas dominan cada vez más en el censo global. Si esa tendencia se mantiene durante los primeros 400 millones de años, se multiplicarán los beneficios de las lentes gravitatorias. A partir de los cálculos actuales, podemos concluir que las lentes serán la clave para descubrir las primeras galaxias del universo con el JWST.

Es prácticamente seguro que el JWST verá galaxias tal y como eran 300 millones de años después de la gran explosión. Y albergamos grandes esperanzas de que las lentes nos permitan contemplar galaxias de los primeros 200 millones de años (suponiendo que se formaran tan pronto), lo que reduciría nuestra laguna histórica a la mitad.

Tendremos que ponernos en marcha tan pronto como se lance el JWST, ya que podríamos disponer de tan solo cinco o diez años para trabajar con él. Aunque el Hubble sigue operando a pleno rendimiento 28 años después de su lanzamiento, el JWST solo transportará combustible suficiente para un decenio. Está previsto que vuele a un millón y medio de kilómetros de la Tierra, demasiado lejos para que los astronautas puedan mantenerlo, repararlo o agregar nuevos instrumentos, como hicieron en varias ocasiones con el Hubble. RELICS es clave para aprovechar al máximo el JWST mientras disponemos de él, puesto que ya ha identificado algunas de las galaxias antiguas más adecuadas para observarlas en detalle, así como las regiones del cielo más amplificadas por las lentes gravitatorias, en las que el JWST puede buscar nuevas galaxias.

MIRAR ATRÁS

La Vía Láctea probablemente sea tan antigua como SPT0615-JD. La diferencia es que vemos nuestra galaxia tal y como es hoy, pero no sabemos qué aspecto tenía en el universo primitivo. Dado que la luz de SPT0615-JD ha tardado tanto en llegar aquí, lo que estamos viendo es una versión «fosilizada» de cuando era más joven.

Sin embargo, SPT0615-JD y nuestra galaxia podrían haber vivido historias similares durante los últimos 13.000 millones de años. Es probable que alrededor de las estrellas de SPT0615-JD se formaran planetas. Tal vez la vida surgió en alguno de ellos. Y quizá, solo quizá, parte de esa vida desarrolló inteligencia, cultura, tecnología y telescopios espaciales. De ser el caso, podrían estar mirándonos ahora a través del mismo cúmulo de galaxias, y viendo, igual que nosotros, un punto rojo pálido: la imagen aumentada de la Vía Láctea tal y como era poco después de nacer.

Son estas posibilidades las que nos llevan a explorar las fronteras del universo. Deseamos descubrir nuestros orígenes y, en última instancia, encontrarnos a nosotros mismos. IyC

PARA SABER MÁS

RELICS: A candidate z~10 galaxy strongly lensed into a spatially resolved arc. Brett Salmon et al. en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 864, n.º 1, art. L22, septiembre de 2018. **http://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aadc10**

Página web del proyecto RELICS: **https://relics.stsci.edu**

EN NUESTRO ARCHIVO

La edad oscura del universo. Abraham Loeb en *IyC*, enero de 2007.

El primer resplandor de las estrellas. Michael D. Lemonick en *IyC*, julio de 2014.

Veinticinco años del Hubble. Axel M. Quetz y Uwe Reichert en *IyC*, abril de 2015.


EL CANGURO es uno de los iconos de Australia. Como él, numerosas especies son características de ciertas regiones del mundo y habitan solo en ellas.

BIOGEOGRAFÍA

LAS FRONTERAS

Los cambios climáticos de ayer y de hoy, los movimientos tectónicos y las cadenas montañosas explican las diferencias en la distribución de las especies en la Tierra

G. Francesco Ficetola



DE LA VIDA

EN SÍNTESIS

Las especies no presentan una distribución homogénea en nuestro planeta, un fenómeno que ya intrigó a naturalistas de la talla de Alfred Russel Wallace en el siglo XIX.

Precisamente Wallace, gracias a sus observaciones, dividió el mundo en seis regiones biogeográficas principales; cada una de ellas alberga una fauna única y combinaciones de especies que no se observan en otras zonas de la Tierra.

Ahora la ciencia ha logrado identificar qué factores determinan las diferencias entre las zonas biogeográficas, pero señala que los límites de estas son cada vez menos claros debido a los efectos de la actividad humana, incluido el calentamiento global.

G. Francesco Ficetola es profesor de zoología en la Universidad de Milán. Investiga los factores que determinan la distribución de la biodiversidad animal a escala mundial y local, e intenta comprender cómo las especies responden a los cambios ambientales inducidos por el ser humano.



Los naturalistas siempre han sabido que las especies animales y vegetales no se distribuyen homogéneamente en la Tierra: si queremos ver leones probablemente viajaremos a África, mientras que para observar canguros y koalas tendremos que ir a Australia. Hace más de un siglo el naturalista británico Alfred Russel Wallace utilizó el conocimiento de la época sobre la distribución de los mamíferos y de las aves para tratar de describir las diferencias en la fauna entre las distintas zonas del mundo. Enardecido defensor de la teoría de la evolución junto con Charles Darwin, Wallace sigue siendo considerado el padre de la biogeografía, la ciencia que estudia la distribución de los organismos. Después de viajar durante mucho tiempo por Asia y Oceanía, Wallace se dio cuenta de que una frontera biogeográfica separaba a Australia, habitada en su mayor parte por marsupiales como los canguros y los koalas, del archipiélago indonesio, habitado por mamíferos parecidos a los que viven en el resto de Asia.

La frontera biogeográfica entre Australia y Asia no es la única que existe en el mundo. Wallace advirtió que la fauna norteamericana era muy diferente de la que vivía al sur de México, o que la fauna de la India e Indonesia tenía poco que ver con la del resto de Asia. Estas observaciones le permitieron dividir el mundo en seis regiones biogeográficas principales (también llamadas reinos), cada una de las cuales albergaba una fauna exclusiva y combinaciones de especies que no se observan en otros lugares. Las bautizó como región paleártica (Europa y parte de Asia), neoártica (América del Norte), neotropical (América del Sur y Central), etíope (la mayor parte de África), oriental (Asia sudoriental) y australiana. Estas macrorregiones corresponden solo en parte a los continentes y pueden dividirse en un cierto número de subregiones.

Más de un siglo después de los primeros mapas publicados por Wallace, las investigaciones biogeográficas siguen activas. El naturalista se vio obligado a diseñar los mapas a partir de información incompleta sobre la distribución de un cierto número de especies de mamíferos y aves. Sin embargo, desde hace algunos años están publicándose datos cada vez más precisos sobre un número cada vez mayor de especies. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza ha publicado mapas de la distribución de 28.000 especies de anfibios, mamíferos, reptiles y aves, que pueden consultarse libremente. Los datos de distribución, cada vez más precisos, se analizan con complejas técnicas estadísticas que permiten procesar rápidamente los datos de miles de especies, considerando también la distancia evolutiva entre ellas.

Con la ayuda de esas técnicas, entre 2012 y 2013 dos grupos de investigación publicaron de manera independiente nuevos mapas biogeográficos del mundo y propusieron una regionalización basada en el análisis de datos de distribución de miles de especies. Los resultados de estos análisis se parecen asombrosamente a los que Wallace obtuvo sin los métodos cuantitativos y confirman el genio del gran naturalista. Sin embargo, los nuevos mapas biogeográficos tienen una resolución y precisión sin precedentes, y permiten medir las relaciones y la tasa de divergencia entre las diversas zonas. Las seis macrorregiones de Wallace pueden dividirse en once regiones, y estas, a su vez, en veinte subregiones. La divergencia entre macrorregiones es mayor que entre regiones, y estas, por su parte, son más diferentes entre sí que las subregiones. Imaginemos que viajamos desde el África subsahariana hasta el África central. En el camino observaremos diferencias de fauna relativamente pequeñas: en ambas zonas hay mamíferos, como el cerdo hormiguero, u oricteropo, y muchas especies de primates, y todo el continente africano al

PÁGINAS ANTERIORES: © ROSS1248/ISTOCK

sur del Sáhara comparte los mismos grupos de anfibios. Pero si nos desplazamos hacia el norte de África, apreciaremos que las diferencias son más acusadas, y lo son aún más entre el norte de África y Europa.

LLEGAN LOS DATOS

Hasta ahora, los análisis biogeográficos han sido por lo general muy descriptivos. En ellos se refieren las diferencias entre zonas, se identifican las especies más características de una u otra región y se propone la localización de las fronteras biogeográficas y de posibles zonas de transición. Pero ¿por qué existen diferencias tan acusadas entre la fauna de China y la India? ¿Por qué no hay canguros en Europa, monos en América del Norte o salamandras en África Central? ¿Por qué la frontera entre dos regiones sigue un trazado determinado y no pasa 2000 kilómetros más al norte o más al sur?

Son preguntas que los biogeógrafos se han planteado a menudo, pero hasta ahora los análisis se han limitado a zonas pequeñas o a unas pocas especies. Faltaba un análisis global que intentase identificar los factores que determinan los límites de las regiones biogeográficas a escala mundial. Además, no debemos olvidar que estas regiones tienen una estructura jerárquica, ya que dentro de cada macrorregión podemos encontrar varias regiones y subregiones. ¿Son los factores que determinan la mayor divergencia faunística (entre macrorregiones) los mismos que determinan las diferencias más débiles (entre subregiones)?

Hace unos tres años, junto con algunos colaboradores de la Universidad de Grenoble comenzamos a pensar en estas cuestiones y nos propusimos buscar una manera de identificar los factores que determinan las divergencias entre zonas biogeográficas. Por suerte, en 2013, el biólogo de la Universidad de Copenhague Ben G. Holt publicó en *Science* unos mapas biogeográficos especialmente completos basados en datos de todas las especies de mamíferos, aves y anfibios (en total, más de 20.000), en los que se tenía en cuenta la divergencia evolutiva entre ellas. Además, en los últimos años se han puesto a disposición de todo el mundo grandes bancos de datos geográficos que describen en detalle el clima, la orografía y la geografía de todo el planeta.

CUATRO PROCESOS

El aislamiento causado por los mares y los océanos suele ser la causa más obvia de las diferencias biogeográficas. De hecho, entre las zonas más divergentes encontramos la región australiana y Madagascar: los océanos que rodean Australia representan la explicación más obvia de la increíble divergencia de la fauna en esta región. Sin embargo, nuestro análisis se centró en las fronteras biogeográficas que atraviesan los continentes, porque en este caso los procesos subyacentes a la divergencia biogeográfica resultan bastante más polémicos. Nosotros planteamos que en la divergencia intervenían cuatro procesos principales. Estos ya se habían propuesto para explicar una o más fronteras biogeográficas, pero faltaba un cuadro general que incluyera todas las fronteras biogeográficas al mismo tiempo.

El primer proceso es la existencia de barreras climáticas. Cada especie se adapta a un clima específico, y el límite de su distribución suele estar causado por climas desfavorables. Al norte, las zonas de distribución geográfica de las especies, o areales, de numerosos animales no pueden extenderse hacia donde las temperaturas son demasiado bajas para sus necesidades fisiológicas. Asimismo, un clima demasiado árido, demasiado lluvioso o con acusadas diferencias estacionales puede volver una zona inadecuada para una especie, limitando así su distribución. Nosotros planteamos la hipótesis de que cuando el clima (temperaturas o precipitación) cambia fuertemente entre zonas geográficas vecinas, se forman «barreras climáticas» que pueden dar lugar a fronteras biogeográficas.

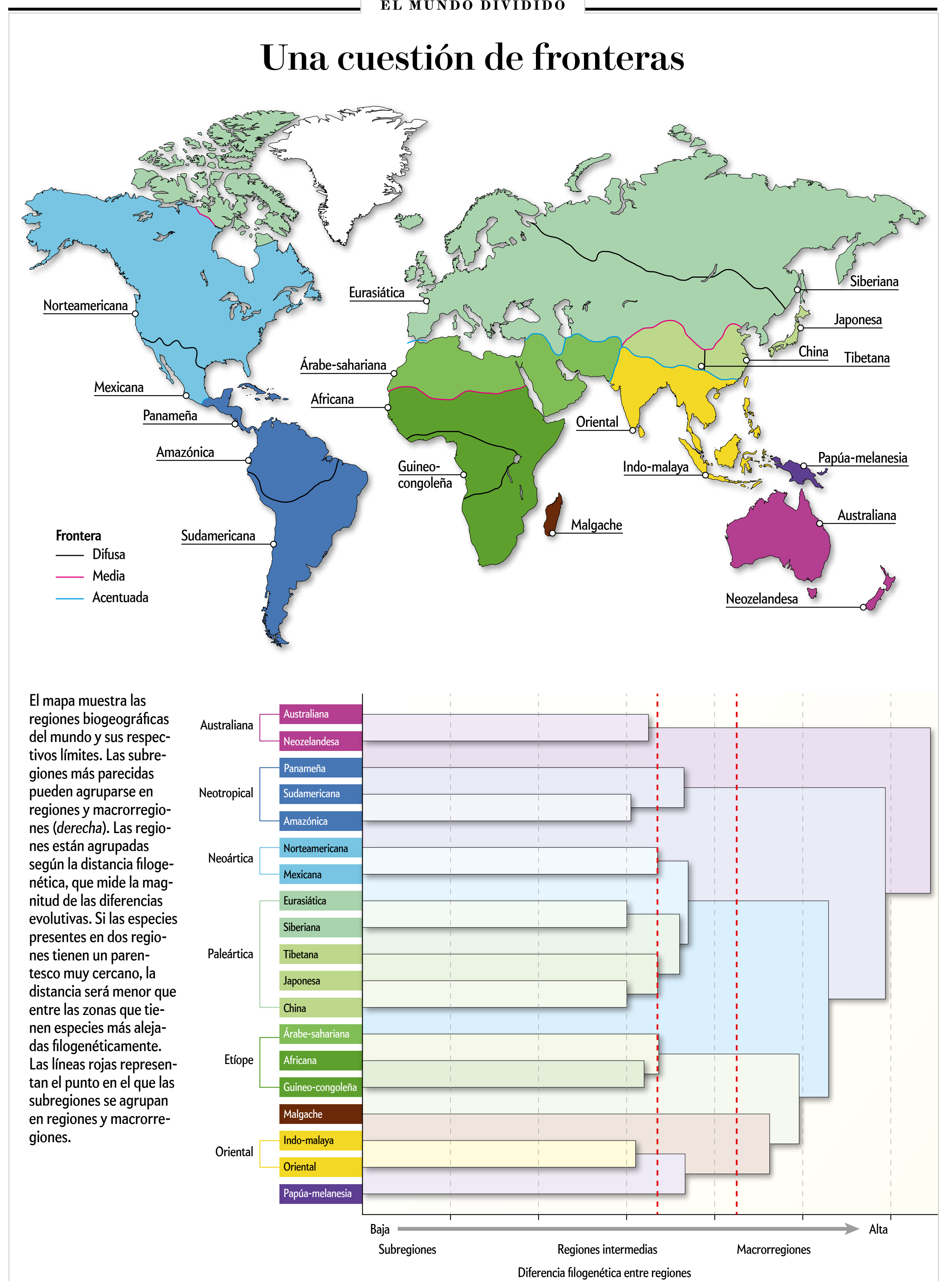
El segundo proceso guarda relación con los cambios climáticos del pasado. En los últimos cientos de miles de años el clima ha experimentado grandes variaciones. Desde hace



© YAIRLEIBO/ISTOCK

EN AMÉRICA DEL NORTE no hay simios, pero América del Sur alberga numerosas especies, como el tamarino león de cabeza dorada.

Una cuestión de fronteras



El mapa muestra las regiones biogeográficas del mundo y sus respectivos límites. Las subregiones más parecidas pueden agruparse en regiones y macrorregiones (*derecha*). Las regiones están agrupadas según la distancia filogenética, que mide la magnitud de las diferencias evolutivas. Si las especies presentes en dos regiones tienen un parentesco muy cercano, la distancia será menor que entre las zonas que tienen especies más alejadas filogenéticamente. Las líneas rojas representan el punto en el que las subregiones se agrupan en regiones y macrorregiones.

DANILO SOSSI, SEGÚN EL AUTOR. FUENTE: «AN UPDATE OF WALLACE'S ZOOGEOGRAPHIC REGIONS OF THE WORLD», POR B. HOLT ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 339, N.º 6115, PÁGS. 74-78, 4 DE ENERO DE 2013 (*mapa*)

21.000 años, al final de la última glaciación, se produjeron cambios extremadamente pronunciados. El final de las glaciaciones permitió a muchas especies desplazarse hacia el norte y colonizar las zonas antes ocupadas por el hielo. Algunos de los nuevos límites biogeográficos podrían corresponder a zonas donde entraron en contacto faunas diferentes que, desde varias zonas de refugio, recolonizaron regiones dejadas libres por la retirada del hielo.

El tercer proceso es la tectónica. La actual distribución de los continentes es el resultado de impresionantes movimientos de placas. En los últimos sesenta millones de años los continentes han cambiado notoriamente su posición, y algunas zonas que hoy se hallan en contacto estuvieron separadas durante decenas de millones de años. Proponemos la hipótesis de que las fronteras biogeográficas pueden coincidir con las zonas donde los movimientos tectónicos de los últimos sesenta millones de años han sido más rápidos.

Por último, no olvidamos el papel de las barreras orográficas. Las cadenas montañosas siguen siendo un obstáculo difícil de superar para todos los animales terrestres, especialmente para las especies no voladoras. Estas barreras podrían explicar numerosas fronteras biogeográficas.

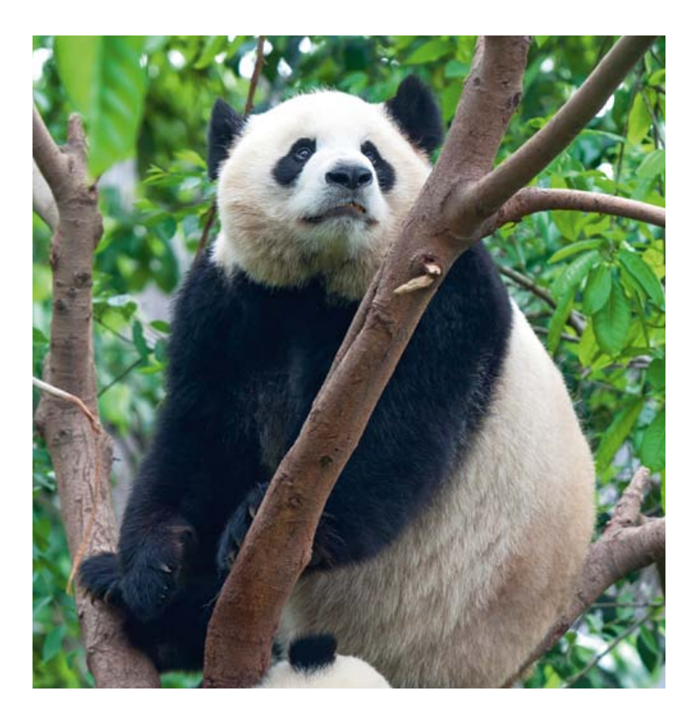
CONOCER DÓNDE Y POR QUÉ

Conocer cuál de los procesos ha influido en la distribución de las especies no resulta fácil. En realidad, podemos imaginar que los cuatro actúan juntos, sobre todo si se tiene en cuenta que no son independientes. Los movimientos entre los continentes ayudan a crear cadenas montañosas, y estas, a su vez, influyen en la circulación atmosférica y modifican el clima. Así que nuestro grupo dedicó un tiempo considerable a identificar los métodos estadísticos que permitirían evaluar la importancia relativa de estos procesos y mostrar dónde son más importantes.

Si consideramos todas las fronteras biogeográficas que atraviesan los continentes, resulta evidente el papel que desempeñan las barreras climáticas, tectónicas y orográficas, pero su repercusión individual varía mucho de una frontera a otra. En cambio, nuestros análisis globales han demostrado que los cambios climáticos producidos después del final de las glaciaciones no ejercen un papel importante.

Las diferencias climáticas actuales entre zonas geográficas originan sobre todo fronteras responsables de divergencias menores. La transición entre la Amazonía y la región sudamericana es un ejemplo de frontera poco profunda: algunas especies, como el capibara y los osos hormigueros, viven en ambas subregiones, y muchas especies amazónicas guardan un estrecho parentesco con otras del resto de América del Sur. Lo que determina la frontera entre ambas regiones es la estacionalidad. Así, mientras que en la Amazonía las temperaturas son casi constantes durante todo el año, en las zonas más meridionales aparece una estacionalidad que se corresponde con la transición del bosque tropical a la sabana. En África se observa una transición semejante. Aquí, también, el límite de la región guineo-congoleña, dominada por los bosques tropicales, coincide con el aumento de la estacionalidad.

Las diferencias climáticas contribuyen, asimismo, a mantener separadas faunas que permanecieron aisladas durante millones de años. Un ejemplo lo ofrece América. Ambos subcontinentes entraron en contacto hace unos 12 millones de años, y allí evolucionó una fauna distinta a la de los otros continentes. Pero, aún hoy, la fauna de América Latina (neotropical) sigue



EL PANDA GIGANTE es un mamífero autóctono de las montañas de China central.

© HUNG CHUNG CHIH/ISTOCK

siendo bien diferente de la de América del Norte (paleártica), aunque la frontera entre estas dos regiones es bastante confusa. Por otra parte, la transición biogeográfica más fuerte no parece corresponder al punto de contacto entre las placas continentales (istmo de Panamá), sino que se encuentra 2000 kilómetros más al norte, en México. Desde hace décadas, los biogeógrafos debaten sobre la localización y las causas de esta frontera, y algunos consideran la región al norte de Panamá como una amplia franja de transición entre la fauna neotropical y la paleártica. Nuestros datos sugieren que en este caso el clima es el factor que mantiene el aislamiento entre las faunas, ya que la frontera corresponde a la región donde las temperaturas pasan de tropicales a subtropicales. Sin embargo, las barreras climáticas son mucho menos netas que las tectónicas u orográficas, lo que determina los límites biogeográficos confusos de esta zona.

Las barreras tectónicas suelen originar límites biogeográficos bastante fuertes y nítidos. La separación de las placas continentales en el pasado dio lugar a largos períodos de aislamiento que favorecieron la evolución de una fauna y flora distintas. La India, que permaneció aislada de Eurasia durante mucho tiempo (hasta hace 20 o 25 millones de años, según las estimaciones propuestas por el geólogo Douwe van Hinsenbergen, de la Universidad de Oslo), desarrolló una fauna con características únicas y un gran número de grupos endémicos. No obstante, cuando entró en contacto con los otros continentes, otros procesos limitaron la mezcla de las faunas. La colisión entre la India y Eurasia llevó a la formación de las impresionantes cadenas montañosas del Himalaya, que representan un obstáculo formidable para la dispersión de los organismos. Esta barrera parece ser también una de las fronteras biogeográficas más fuertes y claras, y fue destacada en el pasado por investigadores que trabajaban en un gran número de grupos taxonómicos.

A escala mundial, uno de los límites biogeográficos más nítidos es el que separa la zona septentrional de Eurasia (paleár-

Causas de las separaciones

Temperatura media anual (heterogeneidad)

Barreras orográficas

Movimientos tectónicos

Temperatura (estacionalidad)

Intensidad de la relación

Baja

Alta

El autor y sus colaboradores han estudiado las variables ambientales que determinan la separación entre regiones biogeográficas. En la columna de la izquierda, el análisis consideró todas las barreras biogeográficas, incluidas las menores. En la de la derecha, se centró en las barreras más acentuadas. Los mapas representan los resultados de la regresión ponderada geográficamente; los colores más intensos indican un efecto más fuerte de la variable.

DANILO SOSSI, SEGÚN EL AUTOR. FUENTE: «GLOBAL DETERMINANTS OF ZOOGEOGRAPHICAL BOUNDARIES», POR G. F. FICETOLA ET AL. EN *NATURE ECOLOGY & EVOLUTION*, VOL. 1, ART. 0089, 6 DE MARZO DE 2017

BARRERAS ENTRE BIORREGIONES

Las variables más importantes



Estos mapas muestran el papel que desempeñan las cuatro variables ambientales más importantes en la determinación de la separación entre regiones geográficas. A la izquierda, para todas las barreras; a la derecha, para las más acentuadas.

DANILO SOSSI, SEGÚN EL AUTOR

tica) de las macrorregiones tropicales y subtropicales de África y Asia. Esta fractura coincide con una zona donde tres de los procesos que hemos propuesto (tectónica, orografía y clima) actúan conjuntamente y se refuerzan entre sí. Los movimientos tectónicos pusieron en contacto faunas que habían estado aisladas durante mucho tiempo, y la colisión entre las placas dio lugar a cordilleras que impiden su dispersión. Por el contrario, en ausencia de barreras tectónicas anteriores, la influencia de las cadenas montañosas parece bastante limitada. Finalmente, estas grandes cordilleras, orientadas de este a oeste, separan climas muy diferentes. Al desplazarse desde la India hacia el norte se pasa de climas tropicales y subtropicales a los fríos desiertos de Asia central, y esto, evidentemente, contribuye a las diferencias faunísticas.

¿HACIA LA HOMOGENEIZACIÓN?

Las regiones biogeográficas son el resultado de procesos que duraron decenas de millones de años, durante los cuales la evolución, la geografía y la heterogeneidad ambiental interaccionaron para formar la inmensa variedad que vemos a través de los continentes. Sin embargo, en los últimos siglos, la actividad humana está modificando la estructura biogeográfica a una velocidad sin precedentes. En primer lugar, los humanos transportamos especies animales y vegetales por todo el planeta, que logran así superar barreras geográficas y ecológicas y llegar a zonas que de otro modo nunca habrían podido colonizar. En muchos casos, hemos introducido las especies de forma voluntaria, como los conejos europeos en Australia y América del Sur, o las tortugas norteamericanas en Europa. Aún más a menudo, los animales han viajado como polizones: así es como las ratas y el mosquito tigre se han esparcido por todo el mundo. Estas invasiones causan grandes perjuicios económicos y una disminución notable de la biodiversidad. Muchas especies autóctonas se están extinguiendo debido a la introducción de depredadores o competidores procedentes de otras partes del mundo. Además, la propagación de especies exóticas está desdibujando con rapidez las diferencias faunísticas entre las zonas geográficas, lo que lleva a una homogeneización de la fauna y a una pérdida de la biodiversidad en todo el planeta.

Desgraciadamente, las proyecciones para el futuro no son optimistas. Por un lado, el número de especies invasoras está ascendiendo debido a la aceleración de los intercambios comerciales a escala mundial. Además, muchas especies están modificando sus áreas de distribución como respuesta a las variaciones climáticas actuales, por ejemplo, desplazándose hacia zonas más septentrionales. Debido a que las diferencias climáticas sustentan la diversidad de especies entre zonas geográficas, si no logramos frenar el cambio climático podemos esperar perturbaciones en la distribución de las especies, con consecuencias difíciles de predecir en términos de biodiversidad y de funcionamiento de los ecosistemas.

Todavía es posible intervenir, tanto para frenar la expansión de las especies exóticas como para mitigar el calentamiento global, pero debemos actuar pronto, porque solo una respuesta rápida puede limitar las consecuencias de los cambios globales en curso.

© Le Scienze

PARA SABER MÁS

The geographical distribution of animals. A. R. Wallace. Cambridge Library Collection, 2011.

Greater India basin hypothesis and a two-stage cenozoic collision between India and Asia. D. J. J. van Hinsbergen et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, n.º 20, págs. 7659-7664, 15 de mayo de 2012.

An update of Wallace's zoogeographic regions of the world. Holt B. et al. en *Science*, vol. 339, n.º 6115, págs. 74-78, 4 de enero de 2013.

Global determinants of zoogeographical boundaries. G. F. Ficetola et al. en *Nature Ecology & Evolution*, vol. 1, art. 0089, 6 de marzo de 2017.

La web de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza permite acceder al mapa de distribución de 28.000 especies de vertebrados: **http://www.iucnredlist.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

Conservación de la biodiversidad. Stuart L. Pimm y Clinton Jenkins en *IyC*, noviembre de 2005.

¿Qué mecanismos regulan la distribución de la biodiversidad? Andrés Baselga en *IyC*, julio de 2014.

La flora de los márgenes de África. Isabel Sanmartín, Lisa Pokorny y Mario Mairal en *IyC*, enero de 2016.

por Inmaculada Llamas, Marta Torres y Victoria Béjar

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Exopolisacáridos microbianos

En los ambientes hipersalinos vive una diversidad de bacterias que producen sustancias de interés comercial

Numerosos hongos y bacterias presentan en su cubierta externa unas sustancias, los exopolisacáridos, que ejercen funciones biológicas esenciales. Además de facilitar la adhesión a otros organismos y a superficies inertes, ofrecen protección frente a las amenazas externas, como el ataque de virus, protistas y células inmunitarias, la acción de compuestos tóxicos y las condiciones ambientales extremas.

En la naturaleza los exopolisacáridos facilitan el desarrollo de asociaciones microbianas en forma de biopelículas. El sarro de los dientes, así como las incrustaciones que se acumulan en la superficie de los barcos, en las tuberías o en las prótesis, son ejemplos de biopelículas que causan numerosos problemas económicos y sanitarios.

Pero, a pesar de esos efectos perjudiciales, los exopolisacáridos presentan diversas aplicaciones biotecnológicas de gran interés. Su composición química y sus características físicas les otorgan propiedades viscosizantes, gelificantes o emulgentes. Destacan el xantano y el gelano, aprobados como aditivos alimentarios (E-415 y E-418, respectivamente) y empleados para la preparación de helados, salsas, mermeladas y jaleas. Ambos se utilizan también en la industria farmacéutica, textil, petrolera y agrícola.

Las bacterias halófilas que viven en el mar y en ambientes hipersalinos son una fuente poco conocida de exopolisacáridos. Nuestro grupo ha descrito varios de ellos. El maurano, sintetizado por *Halomonas maura*, tiene propiedades viscosizantes semejantes a las del xantano; los exopolisacáridos de *Halomonas eurihalina* son capaces de gelificar a pH ácido; los de *Halomonas ventosae* son emulgentes; y el de la cepa HK30 de *Halomonas stenophila* presenta una elevada actividad floculante. Todos son apropiados para ser utilizados en las industrias alimentaria y petrolera. También destacan los de *Salipiger mucescens* y *Alteromonas stellipollaris* por su elevado contenido en fucosa, un monosacárido de gran interés en la industria cosmética y como probiótico; y el de la cepa B100 de *Halomonas stenophila*, que induce selectivamente la apoptosis (muerte celular) de linfocitos T en la leucemia humana.

Sin duda, el mar y los hábitats hipersalinos son una fuente de productos de gran valor biotecnológico, y todavía quedan muchos que aún están por descubrir.

Inmaculada Llamas, Marta Torres y Victoria Béjar
Facultad de Farmacia
Departamento de Microbiología
Universidad de Granada



200 nm

▲ ESTAS DOS CEPAS DE LA BACTERIA *Alteromonas stellipolaris* se distinguen en que una de ellas da lugar a colonias de aspecto mucoso, que indican la producción de exopolisacáridos (*izquierda*), mientras que la otra no (*derecha*).

◀ EL EXOPOLISACÁRIDO de aspecto filamentoso que presenta la bacteria *Halomonas maura* en su cubierta externa le permite adherirse a las superficies. (Micrografía de barrido)

LAS AGUAS HIPERSALINAS de la Laguna de Fuente de Piedra, en Málaga, constituyen un medio de donde se pueden aislar diversas bacterias productoras de exopolisacáridos.

por Sophia Kivelson y Steven Kivelson



Sophia Kivelson es estudiante del Programa de Sistemas Simbólicos de la Universidad Stanford.

Steven A. Kivelson es profesor en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad Stanford.

¿Cómo deberían ser las teorías de los sistemas complejos?

Los criterios usados para juzgar su validez son más delicados de lo que sugiere una visión simplista del método científico

Desde pequeños nos enseñan que el método científico es un camino seguro hacia la verdad objetiva. Uno de sus elementos básicos es que existen comprobaciones empíricas de una teoría que son cuantitativas e independientes de la opinión humana. Pero en la ciencia de los sistemas complejos, las teorías nunca pueden ser ni totalmente correctas en sentido cuantitativo ni completas en sentido cualitativo. En un influyente artículo de 1972 titulado «More is different», el físico y premio nóbel Philip W. Anderson enfatizó que existe una profunda diferencia conceptual entre las propiedades de los constituyentes individuales y las características emergentes de un agregado.

Basándonos en esa idea, demostraremos aquí que la ciencia de los sistemas complejos requiere estructuras intelectuales completamente distintas que extiendan el concepto de verdad científica. Comenzaremos discutiendo un asunto clave: ¿qué significa comprender un sistema complejo?

Para centrar la discusión, consideremos tres ejemplos. El primero es el clima, un caso clásico de sistema complejo. Los insuperables obstáculos que dificultan la construcción de una teoría predictiva del clima quedan ilustrados en la famosa historia de la mariposa cuyo aleteo produce efectos imprevistos en el siguiente huracán en el golfo de México. Si juzgásemos las teorías científicas solo por la posibilidad de falsar cuantitativamente sus predicciones, todas las teorías sobre la dinámica del clima quedarían descartadas. Si ya es imposible realizar predicciones climáticas precisas en períodos de tiempo cortos, mucho más lo es en escalas de décadas. Pero ello no significa que no puedan obtenerse resultados significativos. De hecho, quienes investigan en sistemas complejos adquieren una comprensión intuitiva de qué requisitos predictivos hay que demandar a una teoría.

Con todo, las diferencias cuantitativas entre la evolución de la temperatura global y las predicciones teóricas han sido aducidas como prueba de que la modelización del clima está irremediablemente condenada al fracaso. Los consiguientes debates sobre el papel de la acción humana en el cambio climático ponen de manifiesto la importancia de llegar a un acuerdo sobre cómo juzgar una teoría. Disponer de estándares precisos y ampliamente aceptados para decidir si los modelos climáticos son correctos es crucial para una comunicación fluida entre individuos con diferente formación técnica.

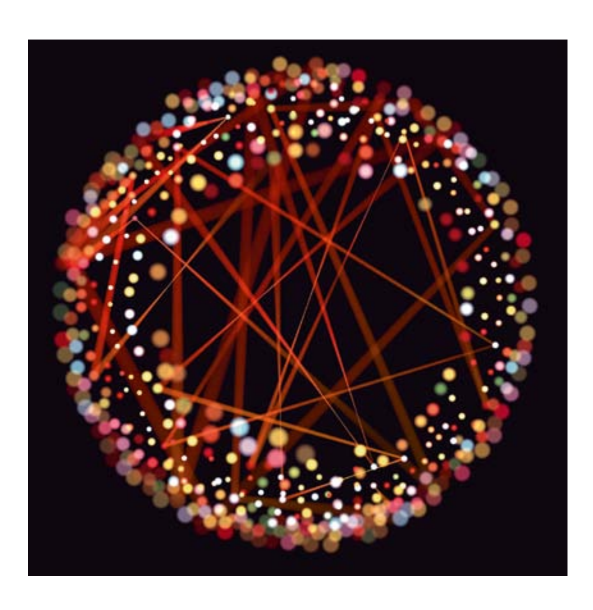
El segundo ejemplo atañe a la teoría BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) de la superconductividad, una de las descripciones más satisfactorias de un fenómeno emergente en física. La teoría no solamente fue reconocida con el Nobel a John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer, sino que es la base de otra media docena de premios Nobel. Asimismo, proporcionó el empuje intelectual decisivo que permitió unificar la electricidad y el magnetismo con la interacción nuclear débil. Sin embargo, hasta la fecha resulta imposible predecir de forma cuantitativa propiedades básicas de los superconductores, como su temperatura de transición (T_c) o, simplemente, si cierto material será o no superconductor.

Ello no ha impedido que la teoría BCS sea un éxito por su simplicidad, aplicabilidad, profundidad intelectual y belleza. Pero lo que hace que BCS constituya una «buena explicación» de la superconductividad no es su habilidad para describir la naturaleza de forma completa y precisa. Su mérito reside en que permite traducir datos físicos a un lenguaje interpretable a la vez que retiene la integridad de los fenómenos en suficiente medida como para tener poder explicativo.

El ejemplo del cambio climático ilustra vivamente los peligros de albergar expectativas poco realistas sobre una teoría de los fenómenos complejos. Sin unos estándares bien definidos y ampliamente aceptados, la opinión pública no puede distinguir entre afirmaciones contrapuestas. El hecho de que la teoría BCS se acepte universalmente muestra que tales estándares existen, a pesar de que en estos momentos sean en gran medida tácitos. Por ello creemos que es necesario articularlos de una forma clara.

Un tercer ejemplo muy ilustrativo es la teoría de la superconductividad a alta temperatura. Los superconductores con temperaturas de transición por encima de la temperatura de ebullición del aire (nitrógeno) se descubrieron hace más de treinta años. Desde entonces, la exploración de sus propiedades ha sido uno de los temas más activos de investigación en física. Ha habido progresos destacados, tanto teóricos como experimentales. Pero, como se recuerda en la introducción de innumerables artículos, aún «no existe consenso en lo referente a la teoría de la superconductividad de alta temperatura».

Ello refleja, en parte, la ausencia de acuerdo sobre qué debe abarcar tal teoría. Lo que a menudo se quiere decir en esos artículos es que ninguna de las teorías existentes puede explicar cuantitativamente las observaciones experimentales que se presentan. Por otra parte, se acepta la imposibilidad de que una teoría pueda explicar todos los fenómenos complejos que se observan en estos materiales: esta debe ocuparse solo de aquellos que se consideren esenciales. Más aún, mientras que para algunos hechos empíricos (como las variaciones de T_c) se requiere una explicación semicuantitativa, para otros bastaría una descripción más cualitativa.



© MATJAZ SLANIC/ISTOCK

El propósito de una teoría de los sistemas complejos es, en principio, dar cuenta de los fenómenos esenciales. Sin embargo, no está claro cuáles son esas propiedades esenciales ni qué tipo de precisión o poder predictivo se necesita para dar el problema por entendido. En los casos en los que es posible comprobar los aspectos cualitativos de la teoría, solamente se aceptan como esenciales un conjunto de propiedades cuidadosamente seleccionadas, como los exponentes críticos en las teorías de las transiciones de fase. La razón no es apriorística, sino que esas son las cantidades que podemos comparar cuantitativamente con las predicciones de la teoría.

Que los criterios para evaluar este tipo de teorías tienen que ir más allá de una aplicación ingenua del método científico es algo intrínseco al estudio de los fenómenos emergentes. Habitualmente, las teorías satisfactorias son ensalzadas por su elegancia y belleza. Pero esto resulta problemático, ya que conlleva el uso de criterios subjetivos (propensos a distorsiones culturales, psicológicas o ambas), así como una selección sesgada de qué elementos son esenciales y cuáles complicaciones irrelevantes.

Es obvio que la ciencia constituye una empresa humana y, como tal, es vulnerable a elementos subjetivos. Tomando prestada la terminología de Thomas S. Kuhn, la «ciencia normal» solo puede tener lugar dentro de los límites del paradigma existente. Más allá del conocimiento adquirido en los libros de texto, a los estudiantes se les enseña implícitamente a evaluar las teorías desde una dimensión estética. Lo inefable se considera a menudo «bello», y es necesario tener en cuenta, junto con estándares más tradicionales, criterios asociados con las ideas de simplicidad, elegancia y comprensión. Ahora bien, si queremos evitar el uso de conceptos tan subjetivos y culturales como el de «belleza», hay que definir de otra forma el significado de esos términos.

Esa es la cuestión. Es necesario —desde el punto de vista tanto filosófico como práctico— establecer criterios apropiados y suficientemente objetivos para evaluar las teorías de los sistemas complejos. Veamos algunas propuestas.

Aplicados a una teoría, términos como *belleza* y *elegancia* se refieren, en realidad, a la efectividad a la hora de comprimir conocimientos. El grado ideal de compresión depende de la finitud del intelecto humano. Así, no esperaríamos de una teoría de la superconductividad de alta temperatura un grado de simplicidad tan extremo que permitiera expresar toda la física básica en un solo tuit. Pero tampoco que requiriese toda una vida de aplicado estudio para apreciar sus aspectos más elementales. El nivel óptimo de simplicidad estaría, pues, ajustado a las capacidades del intelecto humano. Así se tendría en cuenta la comprensión humana pero sin descansar sobre el concepto de belleza, que puede estar determinado culturalmente.

En cambio, no parece que los criterios para distinguir entre fenómenos esenciales y no esenciales sean algo tan innato. Antes bien, exigimos que una teoría exitosa que identifique aquellos aspectos de los fenómenos observables que ella misma establece como esenciales. Es difícil imaginar qué clase de consideraciones a priori podrían haber identificado los exponentes críticos como un aspecto esencial de las transiciones de fase. Solo en el marco de la descripción aceptada identificamos los exponentes críticos como propiedad «universal» clave, y concluimos que una teoría que esté en desacuerdo cuantitativo con los exponentes observados debería descartarse.

Sería deseable que la teoría definitiva de la superconductividad de alta temperatura resolviera preguntas como ¿por qué T_c es alta en ciertos materiales? ¿Existe alguna explicación de las perturbaciones que producen pequeños cambios de T_c? Y sobre todo, ¿puede la teoría predecir un método para aumentar sustancialmente T_c o descubrir nuevos superconductores de alta temperatura?

«More is different» hizo hincapié en un aspecto conceptual: las teorías de los fenómenos emergentes son tan «fundamentales» como las que describen las partículas individuales. Sin embargo, dejó sin explorar las inevitables diferencias entre estos dos tipos de investigaciones. Los estándares cuantitativos usados tradicionalmente para juzgar el éxito de las teorías microscópicas no pueden trasladarse sin más a la ciencia de los sistemas complejos. Hay que adaptarlos. En nuestra opinión, una teoría satisfactoria debería identificar qué características del sistema deben ser objeto de atención. Y, de forma más general, debería perseguir la máxima compresión posible del conocimiento. IyC

Artículo original publicado en *Nature Physics*, vol. 14, págs. 426-427, mayo de 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

More is different. Philip W. Anderson en *Science*, vol. 177, pág. 393, 1972.
Defining emergence in physics. Sophia Kivelson y Steven A. Kivelson en *npj Quantum Materials*, vol. 1, art. 16.024, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Claves de la superconductividad a altas temperaturas. Graham P. Collins en *IyC*, octubre de 2009.
Comprender la complejidad. Geoffrey West en *IyC*, julio de 2013.
La naturaleza de la prueba científica en la era de las simulaciones. Kevin Heng en *IyC*, mayo de 2015.

por Andreu Climent



Andreu M. Climent es investigador y adjunto a la dirección en el Centro de Investigación Biomédica en Red en Enfermedades Cardiovasculares y el Hospital Gregorio Marañón, en Madrid, donde desarrolla modelos para evaluar nuevas terapias de medicina regenerativa cardíaca. Desde 2018 preside la iniciativa #CienciaenelParlamento

La ciencia a disposición de la política

Con la iniciativa Ciencia en el Parlamento se pone en marcha el asesoramiento científico en la elaboración de las leyes

Los pasados días 6 y 7 de noviembre tuvieron lugar en el Congreso de los Diputados las primeras jornadas de la iniciativa ciudadana #CienciaenelParlamento. Cerca de 200 personas del mundo de la ciencia y casi 100 parlamentarios nos sentamos juntos para debatir y buscar formas de colaboración.

La iniciativa nació con el objetivo de fomentar la interacción entre ciencia y política e implantar en España modelos de asesoramiento científico similares a los que ya existen en numerosos países. Todos debemos ser conscientes de que las sociedades que pretendan seguir ofreciendo a sus ciudadanos un Estado de bienestar deben prepararse para un entorno cada vez más cambiante, donde el desarrollo científico-tecnológico y las nuevas necesidades sociales requerirán cambios legislativos que se adapten a esas circunstancias. De hecho, muchos de los países más prósperos hoy lo son, en no menor medida, por haberse preparado para los avances tecnológicos, por haber promovido la innovación de sus economías y por haber conseguido utilizar el conocimiento científico como motor de sus sociedades.

La ciencia no tiene todas las respuestas, ni mucho menos, a la hora de ofrecer soluciones a los políticos o ser empleada como herramienta en las tareas legislativas. Sin embargo, la toma de decisiones informadas de manera correcta aumenta las posibilidades de acertar. Como explicaba Carl Sagan, «la ciencia no es perfecta, con frecuencia se utiliza mal, no es más que una herramienta, pero es la mejor que tenemos: se corrige a sí misma, está siempre evolucionando y se puede aplicar a todo. Con ella, conquistamos lo imposible».

#CienciaenelParlamento arrancó el 1 de enero de 2018 a través de Twitter como una propuesta independiente, gestionada por un grupo de científicos que conocemos lo apreciada que es la ciencia en otros países y buscamos que el conocimiento científico sea el motor de la sociedad también en España. En apenas cuatro semanas conseguimos atraer la atención y el apoyo de miles de personas y decenas de instituciones públicas y privadas. Con esas adhesiones, y gracias a la ayuda crucial de la Fundación Cotec y la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, a principios de febrero presentamos la iniciativa a la presidenta del Congreso de los Diputados, Ana Pastor, y a toda la Mesa del Congreso. La aceptación fue total por parte de los principales grupos parlamentarios, y desde febrero hasta noviembre, investigadores y políticos trabajamos juntos para elegir los temas de debate, formar a un equipo de 24 científicos como técnicos de asesoramiento, encargados de recopilar pruebas científicas y contactar con expertos para las jornadas del pasado noviembre.



PRIMERAS jornadas de #CienciaenelParlamento.

CONGRESO DE LOS DIPUTADOS

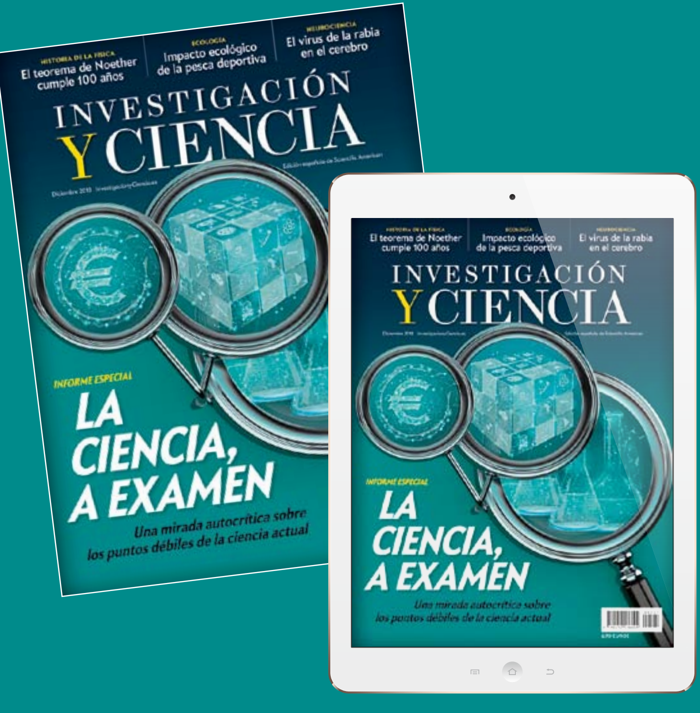
En esta primera reunión se habló sobre doce temas en los cuales la ciencia tiene suficientes datos y conocimientos para poder informar a los políticos: la gestión del envejecimiento, la conciliación laboral, la inteligencia artificial, la prevención activa del suicidio, la ciberseguridad, la contaminación por plásticos, o las migraciones y la inclusión social.

Los políticos pudieron conocer el estado de la cuestión de cada área, así como sus últimos avances, retos y oportunidades. Por su parte, los científicos fueron más conscientes de las dificultades que implica la labor legislativa. Estas jornadas de acercamiento entre ciencia y política, similares a las que vienen sucediendo en Parlamentos de todo el mundo durante los últimos lustros, ha sido el hito central de la iniciativa.

Hacen falta muchos agentes para que las sinergias entre la clase política y los científicos sean efectivas. Uno importante es la creación de una oficina parlamentaria de asesoramiento científico similar a la que existe en el Parlamento europeo o en el británico. Durante las jornadas, Pastor enfatizó que establecer la oficina española era una prioridad para la presente legislatura. Su puesta en marcha será, pues, el siguiente paso de #CienciaenelParlamento. Es imprescindible que sea un organismo ágil, conectado con el mundo académico y el empresarial y que tenga la capacidad de preparar en unas ocho o doce semanas informes breves, de no más de cuatro páginas, sobre el conocimiento actual de una cuestión. Tras haber consultado a decenas de expertos en el área, en los informes deben exponerse las pruebas, las limitaciones, los retos y las oportunidades que plantea el tema. Hay que evitar las recomendaciones: la función de la ciencia es informar; corresponde a los políticos tomar las decisiones.

Estas han sido las primeras jornadas de lo que esperamos dentro de muy poco sea una tradición que pueda ayudar a mejorar la sociedad. Como decía Rosalind Franklin, «la ciencia y la vida ni pueden ni deben estar separadas». IyC

SUSCRÍBETE A INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
  ~~82,80 €~~ 75 €
  por un año (12 ejemplares)
  ~~165,60 €~~ 140 €
  por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Y además elige 2 números de la colección TEMAS gratis







www.investigacionyciencia.es/suscripciones

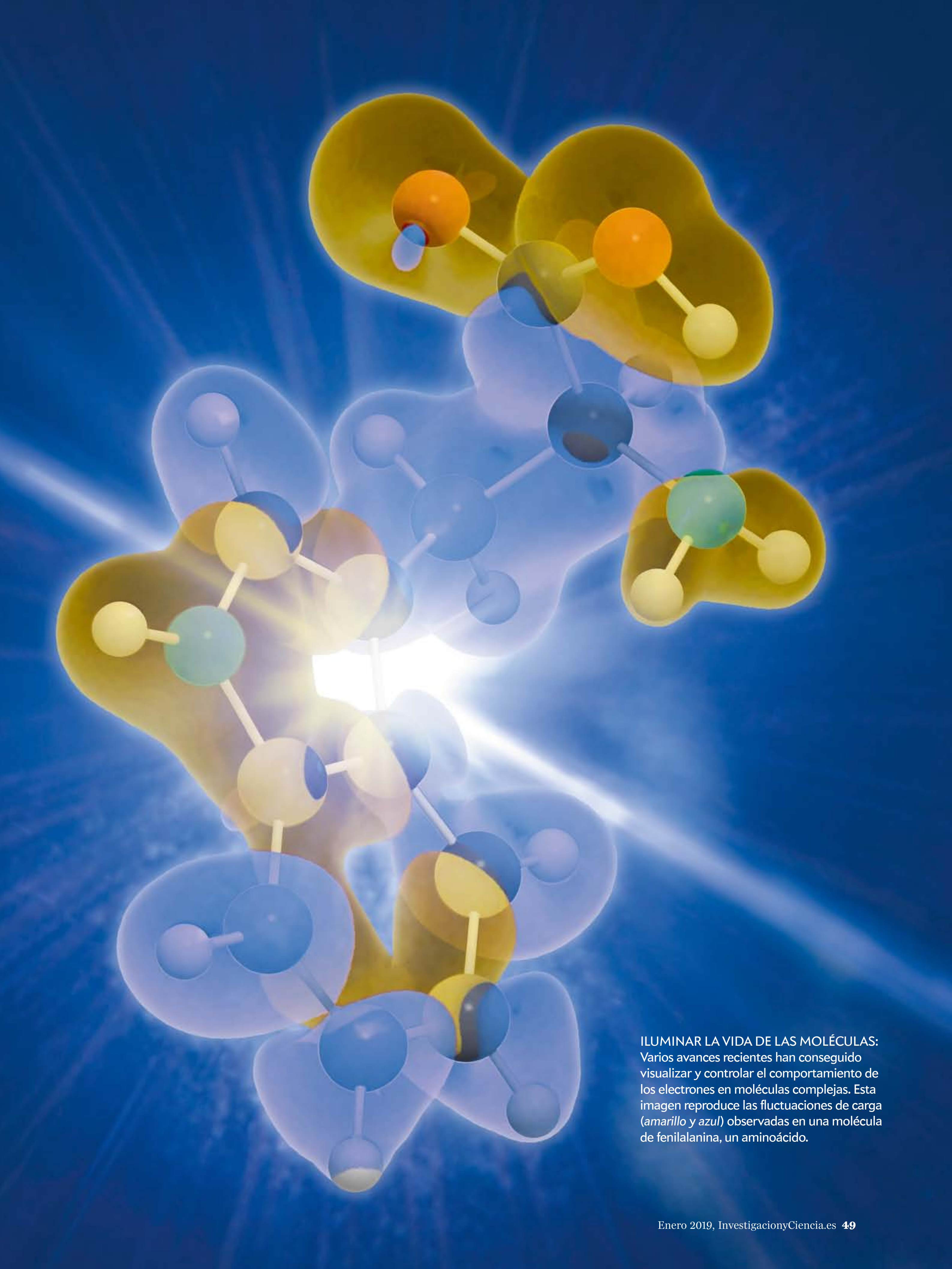
Teléfono: +34 934 143 344

QUÍMICA

EL NACIMIENTO DE LA ATTOQUÍMICA

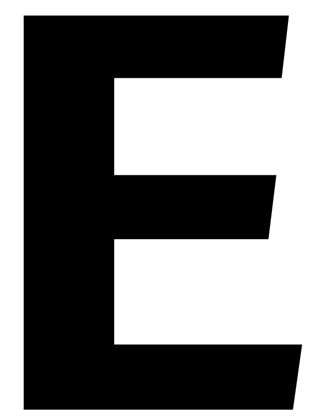
Los pulsos de luz con duración de attosegundos han permitido observar y gobernar el movimiento de los electrones en la materia. El hito abre la puerta a la síntesis de nuevos compuestos y al control de reacciones químicas

Fernando Martín García



ILUMINAR LA VIDA DE LAS MOLÉCULAS: Varios avances recientes han conseguido visualizar y controlar el comportamiento de los electrones en moléculas complejas. Esta imagen reproduce las fluctuaciones de carga (*amarillo y azul*) observadas en una molécula de fenilalanina, un aminoácido.


Fernando Martín García es catedrático de química física en la Universidad Autónoma de Madrid, donde ha destacado por sus contribuciones pioneras al campo de la attoquímica. Ha sido galardonado con los premios nacionales de investigación Rey Juan Carlos I (2000) y Rey Jaime I (2017).



n 1913, para explicar algunas características inusuales del átomo de hidrógeno, Niels Bohr introdujo un modelo atómico «planetario» del átomo en el que el electrón, en contra de lo predicho por la física clásica, solo podía desplazarse a lo largo de ciertas órbitas muy concretas. Esta cuantización del movimiento electrónico abrió un nuevo capítulo en la física y la química, sin el cual no habría sido posible alcanzar el conocimiento y el control sobre la materia del que disponemos hoy.

En el modelo de Bohr todo sucede con enorme rapidez: el «año sideral» de la órbita más próxima al núcleo (es decir, el tiempo que tarda el electrón en recorrerla) se reduce a 0,000000000000000152 segundos, o 152 attosegundos. Dicho valor es aún menor cuando consideramos elementos químicos más pesados. El attosegundo (una trillonésima de segundo, o 10^{-18} segundos) es, por tanto, la escala de tiempo natural en la que se desarrolla el movimiento de los electrones en la materia. Para hacernos una idea de su magnitud, pensemos que un attosegundo es a un segundo lo mismo que un segundo a dos veces la edad del universo. Como consecuencia, en lo que respecta al movimiento de los electrones, un segundo constituye a todos los efectos prácticos un tiempo equivalente a infinito. Estas cifras ilustran el reto científico y técnico que supone medir tiempos a esta escala tan diminuta.

Sin embargo, tales escalas son clave en química. Todas las reacciones se deben a la ruptura y a la formación de enlaces, los cuales determinan por completo la estructura y la reactividad de un compuesto, desde el agua hasta el ADN. Y los responsables de que los enlaces se formen o se rompan son los electrones. Así, la reactividad química obedece a un proceso dinámico que resulta del movimiento combinado de electrones y núcleos atómicos.

El movimiento de estos últimos es notablemente más lento que el de los electrones, ya que se trata de partículas mucho más pesadas. El protón, el núcleo más ligero que existe, es unas 1800 veces más masivo que el electrón, por lo que, a igual cantidad de movimiento (el producto de la masa por la velocidad), su velocidad será unas 1800 veces menor. Como consecuencia, el desplazamiento de los núcleos atómicos procede en escalas de tiempo de femtosegundos (10^{-15} segundos, un tiempo mil veces mayor que el attosegundo). Hace ya algunas décadas que se conocen técnicas para analizar lo que ocurre en el mundo atómico a escalas de tiempo de femtosegundos. Sin embargo, hasta hace poco carecíamos de procedimientos para ampliar dichos métodos a la escala del attosegundo.

Desde comienzos del siglo xxi se han desarrollado herramientas que permiten generar pulsos de luz ultravioleta o de rayos X con una duración de cientos de attosegundos. El efecto ejercido por estos pulsos ha comenzado a revolucionar nuestra visión de la química, ya que, por primera vez, ha abierto la puerta a visualizar y controlar el movimiento de los electrones en átomos y moléculas. En particular, el uso de láseres de attosegundos ha abierto la posibilidad de producir sustancias que no pueden sintetizarse mediante procedimientos tradicionales, así como la de suprimir reacciones indeseadas que ocurren de forma natural. Todo ello ha llevado al nacimiento de una nueva disciplina científica: la attoquímica.

UN ANTEPASADO CERCANO

En los años ochenta del siglo xx, la tecnología láser logró generar los primeros pulsos de luz infrarroja con una duración de decenas de femtosegundos. Eso llevó a los científicos a preguntarse cómo usar tales pulsos para «fotografiar» el movimiento de los núcleos. La pregunta era legítima, ya que, como es bien sabido, para obtener una fotografía nítida de un cuerpo en movimiento, el tiempo de exposición de la cámara ha de ser menor que el que tarda el objeto en desplazarse de manera apreciable; de lo contrario, la imagen aparecerá movida. Esto es algo que experimentamos cuando, por ejemplo, intentamos fotografiar de cerca un coche que se desplaza a gran velocidad y no tomamos la precaución de reducir el tiempo de exposición de nuestra cámara.

EN SÍNTESIS

El movimiento de los electrones en átomos y moléculas procede en escalas de tiempo de attosegundos, o trillonésimas de segundo. Hasta hace poco, no existían los medios para estudiar su comportamiento en tiempo real.

Esa situación ha cambiado en los últimos años. La creación de láseres capaces de generar pulsos de luz de pocos attosegundos de duración ha permitido obtener las primeras imágenes nítidas del movimiento electrónico.

Además de visualizar los electrones, los mismos métodos permiten controlar su movimiento. Ello ha brindado la posibilidad de alterar los enlaces químicos de una molécula y, con ello, sus características químicas y su reactividad.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DEL AUTOR *(molécula)*

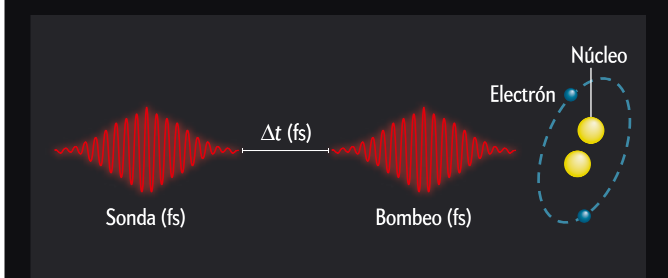
Filmar el mundo atómico

Para captar una imagen nítida de un objeto que se desplaza, es necesario usar una cámara cuyo «tiempo de exposición» sea menor que el que tarda el cuerpo en moverse de manera apreciable. El tiempo que necesita un electrón para circunvalar un átomo es del orden de attosegundos (trillonésimas de segundo, o 10^{-18} segundos). Se trata de una escala diminuta: un attosegundo es a un segundo lo que este a dos veces la edad del universo. Como consecuencia, hasta hace poco los científicos no disponían de los medios técnicos para «fotografiar» electrones en movimiento, ya que no existían cámaras tan rápidas.

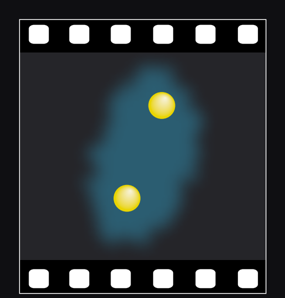
Desde hace unos años, la posibilidad de generar pulsos de luz de attosegundos de duración ha abierto la puerta a observar el movimiento de los electrones. Estas cámaras funcionan mediante el método de «bombeo-sonda»: un primer pulso ultracorto excita el átomo o molécula, y un segundo capta una imagen del sistema (*esquemas inferiores*).

UN ANTECEDENTE: LA CÁMARA DE FEMTOSEGUNDOS

Los núcleos atómicos, mucho más pesados que los electrones, se mueven en escalas de tiempo de femtosegundos (10^{-15} segundos). La tecnología para fotografiar núcleos en movimiento existe desde hace ya varias décadas.



Sonda



1 Dos pulsos infrarrojos (*rojo*) con duración de femtosegundos (fs), el «bombeo» y la «sonda», inciden sobre una molécula de hidrógeno (H_2, *derecha*). La separación temporal Δ*t* que media entre ellos asciende también a varios femtosegundos.

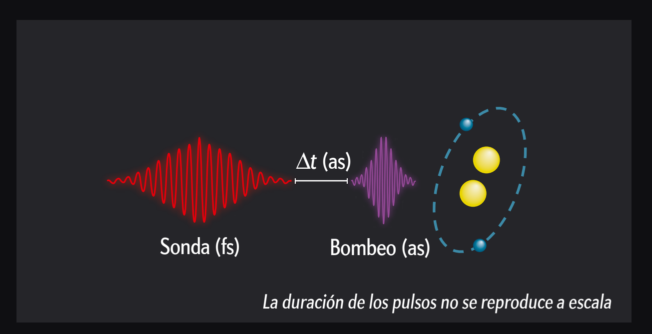
2 La absorción del primer pulso, el de bombeo, transmite energía a los núcleos (*amarillo*), los cuales se ponen en movimiento.

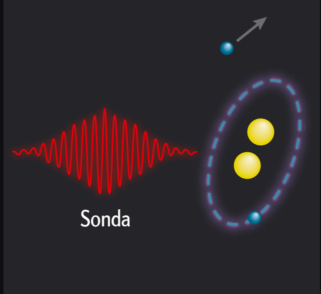
3 El pulso sonda toma una fotografía. Los núcleos aparecen nítidos, pero los electrones se ven borrosos.

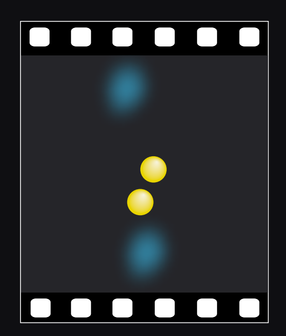
Al repetir el proceso variando el intervalo Δ*t* entre el primer pulso y el segundo, se obtiene una sucesión de fotogramas que, ordenados, proporcionan una película del movimiento de la molécula.

LA CÁMARA DE ATTOSEGUNDOS

A principios de siglo, los avances técnicos permitieron generar pulsos ultracortos de attosegundos de duración. Unos años después, ello abrió la puerta a captar las primeras imágenes de electrones en movimiento.







1 Un pulso ultravioleta o de rayos X (*violeta*) con duración de attosegundos (as) y un pulso infrarrojo de femtosegundos (*rojo*), separados por un intervalo Δ*t* de attosegundos, inciden sobre una molécula de H_2.

2 La absorción del pulso ultravioleta produce la emisión de un electrón (*azul*).

3 El pulso sonda toma una fotografía. Los electrones aparecen «localizados».

Aunque los electrones siguen mostrándose algo borrosos, ello se debe a las limitaciones impuestas por el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, no a imperfecciones en la resolución temporal de la cámara. Lo mismo que con la cámara de femtosegundos, repetir el proceso variando el intervalo Δ*t* permite obtener una película, en este caso del movimiento electrónico.

Así pues, para tomar fotografías nítidas de un núcleo en movimiento, necesitamos tiempos de exposición del orden de femtosegundos. Si, además, deseamos visualizar ese movimiento en forma de «película», habremos de proyectar una sucesión de imágenes tomadas en intervalos de tiempo también de femtosegundos. Ello se debe a que, si el lapso entre un fotograma y el siguiente fuera mayor, nos daría la impresión de que los objetos se desplazan más rápido de lo que en realidad lo hacen. Así ocurría en las antiguas películas de cine mudo: en ellas, dado que las limitaciones técnicas de la época impedían tomar fotografías en intervalos de tiempo lo suficientemente cortos, las personas y los objetos parecían moverse mucho más deprisa de lo normal.

Los láseres de femtosegundos son, pues, la herramienta ideal para filmar el movimiento de los núcleos atómicos. Pero ¿cómo funciona una cámara de femtosegundos? Su inventor fue Ahmed Zewail, del Instituto de Tecnología de California, quien en 1999 recibiría por ello el premio Nobel de química. Estas cámaras operan mediante un proceso conocido como «bombeo-sonda» (*pump-probe*). En él, un pulso láser de pocos femtosegundos de duración (el pulso de bombeo) irradia primero la molécula e induce el movimiento en los núcleos atómicos que la componen. A continuación, un segundo pulso de parecida duración (la sonda), capta una imagen de los núcleos en un instante concreto tras la perturbación causada por el primer pulso.

Esta «fotografía» de la molécula no se obtiene del modo usual. Se genera al detectar los electrones emitidos y los iones que se forman como resultado de la interacción entre el compuesto y el pulso sonda. Gracias a una combinación de campos eléctricos y magnéticos, estas partículas con carga eléctrica se dirigen hacia un conjunto de detectores que miden sus posiciones y momentos. Ello permite reconstruir su trayectoria hasta el detector y, de esta manera, puede deducirse dónde se encontraban en el instante en el que el pulso sonda incidió sobre la molécula. Este tipo de detectores son similares a los que se emplean en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, solo que en versión «de bolsillo».

Lo anterior hace posible obtener una imagen de la molécula en un instante concreto tras la interacción con el pulso de bombeo. Para filmar una película basta con repetir el proceso una y otra vez, partiendo siempre de las mismas condiciones iniciales, e ir variando el intervalo de tiempo que media entre el pulso de bombeo y la sonda. Eso permite conseguir una sucesión de imágenes que, ordenadas en el tiempo y proyectadas una tras otra, componen una película del movimiento de los núcleos. Por lo general, estas filmaciones constan de entre unas decenas y varios centenares de imágenes, aunque no hay ninguna dificultad técnica que impida obtener muchas más.

La femtoquímica constituye hoy una disciplina científica bien establecida. Su principal objetivo consiste en usar pulsos de luz de femtosegundos para controlar y filmar una reacción química dirigiendo el movimiento de los núcleos de las moléculas. En la actualidad, los láseres de femtosegundos son ampliamente utilizados en la mayoría de las áreas de la química y en multitud de laboratorios. Sin embargo, estos láseres no permiten filmar el movimiento de los electrones, ya que, al desplazarse mucho más rápido, las fotografías obtenidas son difusas.

PULSOS DE ATTOSEGUNDOS

En 2001 tuvo lugar una nueva revolución: la generación del primer pulso láser con una duración inferior a un femtosegundo. El hito, logrado por el grupo de Ferenc Krausz, por entonces en la Universidad Técnica de Viena, condujo poco después al desarrollo de los llamados láseres de attosegundos. Gracias a ellos fue posible trabajar por primera vez en esta escala de tiempos, lo que inauguraba la posibilidad de tomar imágenes nítidas de electrones en movimiento.

Las primeras cámaras con una precisión de attosegundos se introdujeron en 2010. Estos dispositivos siguen un esquema de bombeo-sonda muy similar al descrito arriba, aunque con dos diferencias fundamentales. La primera es que el pulso de bombeo, en vez de un ser un pulso infrarrojo de femtosegundos, consta de luz ultravioleta o de rayos X y presenta una duración de attosegundos. La segunda es que el intervalo de tiempo que media entre el primer pulso y el segundo se controla con una precisión que también es de pocos attosegundos. Como consecuencia, la cámara sí logra resolver con detalle el movimiento de los electrones. Si estos no se desplazan demasiado rápido, un pulso sonda de pocos femtosegundos de duración basta para captar una imagen nítida. Con todo, para hacer frente a otros casos más complejos, en la actualidad ya se están utilizando pulsos sonda de attosegundos.

Los pulsos de luz de attosegundos poseen dos características únicas. En primer lugar, debido a la elevada frecuencia de la luz (o, de manera equivalente, a la alta energía de los fotones que la componen), la radiación siempre ioniza los átomos o las moléculas sobre los que incide; es decir, provoca la expulsión de al menos un electrón. Dado que una molécula con carga eléctrica es menos estable que una neutra, a menudo el ion molecular se disocia y da lugar a fragmentos iónicos de menor tamaño.

La segunda propiedad de los pulsos de attosegundos es que, debido a su cortísima duración, la luz de la que se componen no es monocromática; es decir, no consta de un único «color», o frecuencia, sino de un amplio abanico de ellas. Esto es una consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg, solo que en una formulación algo distinta de la usual. En lugar de hacer referencia a la posición y al momento de una partícula, esta variante del principio de incertidumbre nos dice que, cuanto mayor sea la precisión con la que midamos el tiempo, mayor será la incertidumbre en la energía, y viceversa. Dado que los pulsos que nos ocupan pueden caracterizarse con una precisión de attosegundos, la luz de la que se componen presentará una alta incertidumbre en la energía; es decir, en la frecuencia. Por tanto, deberá constar necesariamente de un gran «ancho de banda» que incluirá múltiples frecuencias, desde el ultravioleta lejano hasta los rayos X. Como veremos, estas características desempeñarán una función importante en la manera en que se diseñan las cámaras de attosegundos y en la forma en que deben interpretarse las imágenes.

PELÍCULAS DE ATTOSEGUNDOS

Una vez resuelto el problema de construir nuestra cámara de attosegundos, la cuestión de visualizar y entender la película no es tan sencilla. ¿Basta con mirar directamente la película para entender cómo se mueven los electrones, o hace falta algún tipo de filtro o «gafas» especiales, como las que usamos cuando vamos a ver películas en 3D? Si es así, ¿de qué tipo?

Tales preguntas son relevantes porque, a diferencia de lo que ocurre en el mundo macroscópico, donde la posición de los objetos se encuentra perfectamente definida y puede predecirse de manera determinista a partir de las leyes de Newton, a escala atómica y subatómica la precisión con la que puede conocerse la posición de una partícula se ve limitada por el principio de incertidumbre de Heisenberg. En el caso de los electrones, esta

¿Cómo se generan los pulsos de attosegundos?

Para producir pulsos de luz con una duración de attosegundos y controlar diferencias de tiempo tan diminutas, suele emplearse un método conocido como «generación de armónicos altos», basado en excitar brevemente un átomo de un gas noble (*abajo*). Hasta ahora, el pulso más corto creado con esta técnica ha sido de 67 attosegundos.

CREACIÓN DEL PULSO

Un pulso láser de luz infrarroja y femtosegundos de duración (*rojo*) se hace incidir sobre un gas noble, como el argón. El potencial eléctrico total (*gris*) que siente un electrón viene dado por la suma del potencial atómico más el creado por el pulso infrarrojo.



FILTRADO Y SEPARACIÓN

Una vez generado el pulso de attosegundos, un montaje óptico lo separa del pulso infrarrojo y dispone ambos en la secuencia adecuada.



1 Dado que el campo infrarrojo oscila y el proceso se repite, el resultado es un tren de pulsos de attosegundos de alta energía (*violeta*) superpuestos al pulso infrarrojo original (*rojo*).

2 Mediante filtros específicos para cada longitud de onda, los pulsos de femtosegundos y attosegundos se separan y se eliminan todos los pulsos de attosegundos menos uno.

3 Ambos pulsos se recombinan introduciendo un retraso Δt entre sí, el cual también se controla con una precisión de attosegundos (as). Ello permite crear una secuencia de pulsos bombeo-sonda adecuada para fotografiar átomos y moléculas.

imprecisión asciende a algunos ángstroms (10^{-10} metros, unas 100.000 veces el tamaño de un protón). Ello nos impide saber con exactitud dónde se halla un electrón; en su lugar, habremos de conformarnos con obtener la probabilidad de encontrarlo en la vecindad de un núcleo atómico. Si se trata de una molécula, dicha imprecisión puede llegar a ser tan grande como el tamaño del propio compuesto. Por tanto, aunque empleemos una cámara de attosegundos, nuestras imágenes continuarán siendo algo borrosas. Sin embargo, cabe enfatizar que esta imprecisión obedece a la naturaleza cuántica de los electrones, no a un defecto de la cámara.

Además de esta limitación impuesta por las propias leyes de la naturaleza, para entender nuestra película no basta con «mirar una pantalla». Al contrario que en una fotografía tradicional, lo que se detecta en este caso no es luz, sino flujos de partículas cargadas, electrones e iones, que impactan en detectores que miden su posición y velocidad. La observación de estas partículas no nos proporciona de manera directa ninguna película del movimiento de los electrones o de los núcleos. Para entender lo que sucede, necesitamos unas gafas especiales.

Esas gafas se obtienen resolviendo la ecuación fundamental de la física cuántica, la ecuación de Schrödinger, con una preci-



LÁSERES ULTRARRÁPIDOS: Desde principios de siglo, la posibilidad de generar pulsos láser de attosegundos de duración ha permitido filmar el movimiento de los electrones en átomos y moléculas. Esta imagen muestra un montaje experimental en el laboratorio de attociencia de Jens Biegert, del Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de Barcelona.

JENS BIEGERT/INSTITUTO DE CIENCIAS FOTÓNICAS

sión sin precedentes, lo que exige emplear nuevas herramientas computacionales. No deja de resultar irónico que, para describir el movimiento electrónico durante unos pocos attosegundos, los cálculos necesarios requieran millones de horas (cientos de años) en un procesador de última generación. Así pues, la única manera de reducir la duración de estos cálculos consiste en emplear miles de ordenadores de manera simultánea y repartir de manera eficiente las tareas de cálculo entre ellos. Esta técnica recibe el nombre de computación en paralelo. Así, para un cálculo que requiriese mil horas en un procesador, la correcta distribución del trabajo entre mil procesadores nos permitirá obtener el resultado en solo una hora.

Repartir las tareas de la manera adecuada resulta clave para reducir al máximo la duración de los cálculos, lo cual depende de la eficiencia con que se comuniquen los distintos procesadores. Esto último constituye la base de la supercomputación (*high-performance computing*). Hasta hace poco, en España este tipo de cálculos solo podían llevarse a cabo en el superordenador MareNostrum del Centro de Supercomputación de Barcelona, perteneciente a la Red Española de Supercomputación. Sin embargo, en los últimos años este tipo de máquinas han ido proliferando y ya son varias las que existen en distintos centros, como el supercomputador XCHEM, financiado por el Consejo Europeo de Investigación (ERC) y situado en el Centro de Computación Científica de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM).

ELECTRONES EN MOVIMIENTO

La primera observación del movimiento electrónico en una molécula fue obtenida en 2010 por una colaboración cuya parte experimental fue liderada por Marc Vrakking, del Instituto de Física Atómica y Molecular (AMOLF) de Ámsterdam, y de cuya parte teórica se encargó nuestro grupo de la UAM. El compuesto elegido fue el más simple de todos: la molécula de hidrógeno (H_2), que resulta del enlace covalente entre dos átomos de este elemento y que consta de dos protones y dos electrones.

Para aquel experimento usamos una cámara de bombeo-sonda en la que un primer pulso ultravioleta de unos 300 attosegundos producía la ionización de la molécula (arrancaba un electrón), mientras que un segundo pulso de pocos femtosegundos fotografiaba el electrón que permanecía en el ion H_2^+. Al observar el resultado con las «gafas» apropiadas, resultantes de resolver la ecuación de Schrödinger para las partículas que intervienen en el proceso, logramos obtener la primera película del movimiento de un electrón en una molécula.

Aquella fue la primera vez que se demostró explícitamente que, en un enlace químico covalente, como el que existe en el ion molecular H_2^+, el electrón se mueve a lo largo de todo el enlace y apantalla la repulsión mutua que experimentan los núcleos. Ello confirmaba la imagen que la teoría química venía proporcionando de dichos enlaces. Además, la película también ratificó que el movimiento de los electrones procedía con gran rapidez, en escalas de tiempo del orden de attosegundos, mientras que el de los núcleos lo hacía en escalas de femtosegundos.

EL NACIMIENTO DE LA ATTOQUÍMICA

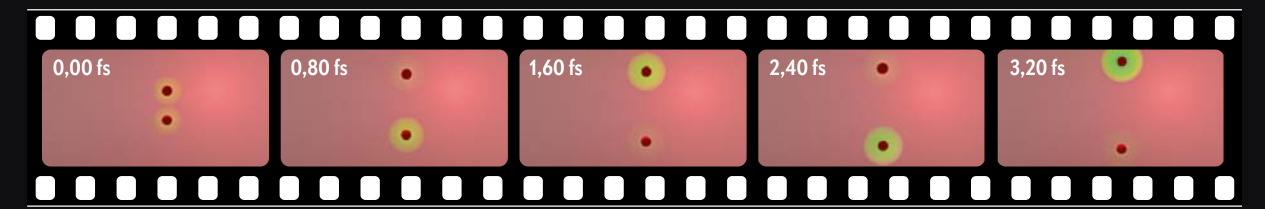
La primera película de attosegundos demostró que las técnicas de bombeo-sonda constituían una herramienta adecuada para visualizar el movimiento de los electrones en moléculas sencillas. No obstante, en los procesos químicos de interés que tienen lugar en la naturaleza intervienen compuestos mucho más complejos. Por tanto, el siguiente paso consistió en emplear esas mismas técnicas para analizar el movimiento electrónico en moléculas de mayor tamaño.

En 2014, en otra colaboración cuya parte experimental fue liderada por Mauro Nisoli, del Instituto de Fotónica y Nanotecnología de Milán, efectuamos el primer análisis de attosegundos de una molécula de interés biológico, el aminoácido fenilalanina. La técnica fue muy similar a la del ejemplo anterior: un pulso ultravioleta de unos 300 attosegundos arrancaba un electrón de la molécula, y la dinámica electrónica generada en el ion resultante se fotografiaba a intervalos de attosegundos mediante pulsos infrarrojos de femtosegundos de duración. En este caso, sin embargo, la mayor complejidad de la molécula hizo que la observación se centrase en otro tipo de fenómenos.

Al tratarse de un sistema con un gran número de electrones, los niveles energéticos asociados a los orbitales moleculares de la fenilalanina se encuentran muy próximos entre sí. Por otro lado, dado que los pulsos de attosegundos se componen simultáneamente de múltiples frecuencias, un electrón emitido con una cierta energía puede provenir no solo del último orbital ocupado, sino de otros más internos de la molécula. Como consecuencia, el ion de fenilalanina puede encontrarse en una superposición cuántica de distintos estados electrónicos. Ello da lugar a un

Las primeras películas del mundo atómico

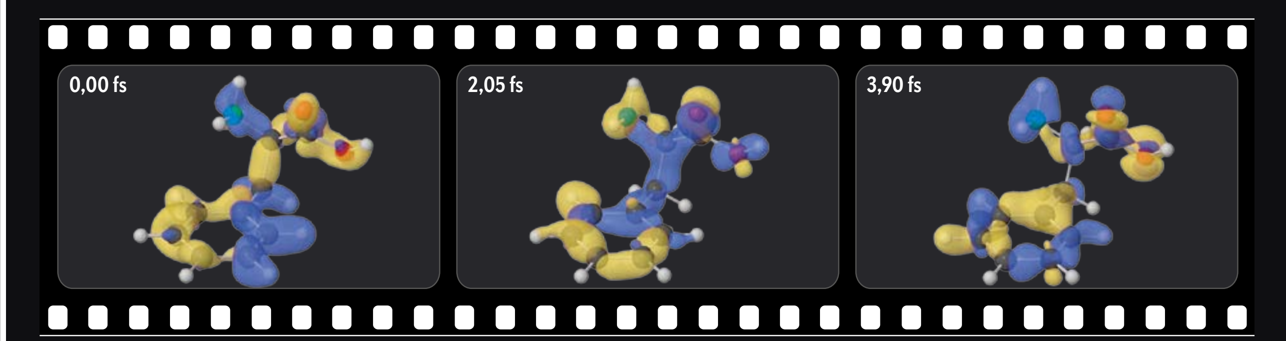
En una molécula, el movimiento de los electrones determina las propiedades de los enlaces químicos y, con ello, la reactividad y las características del compuesto. Desde hace unos años, la posibilidad de observar y controlar el movimiento de los electrones en los enlaces moleculares ha dado lugar al nacimiento de una nueva disciplina: la attoquímica, basada en el uso de pulsos de attosegundos y en cálculos asistidos por superordenadores. Estas imágenes muestran las primeras películas que consiguieron plasmar el movimiento de los electrones en átomos y moléculas.



MOLÉCULA DE HIDRÓGENO

Esta secuencia corresponde a la primera película de attosegundos de la historia, obtenida en 2010. Tras haber arrancado un electrón de la molécula de hidrógeno, las imágenes muestran el movimiento del electrón restante (*verde*) en torno a los dos núcleos atómicos del compuesto (protones, *rojo*). Tras un momento inicial en el que el electrón se halla deslocalizado en torno a ambos núcleos, la partícula comienza a bascular entre uno y otro. Por claridad visual, estas imágenes muestran el estado del sistema cada 0,80 femtosegundos (fs), si bien en un experimento real el intervalo entre fotogramas es mucho menor.

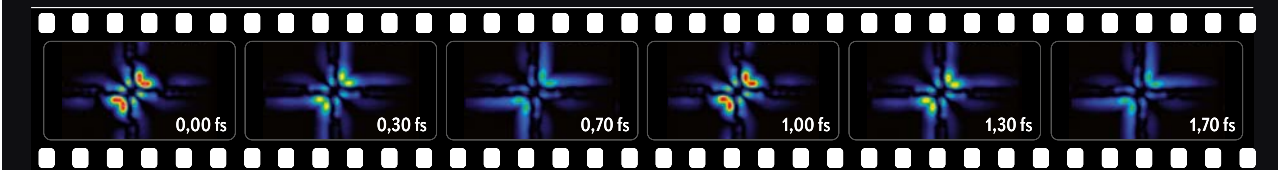
Relevancia: Prueba de concepto. Por primera vez se demostraba la posibilidad de filmar el movimiento electrónico.



BIOMOLÉCULAS

En 2014 se obtuvo la primera película de una molécula compleja, el aminoácido fenilalanina. Estos fotogramas muestran cómo varía el exceso (*amarillo*) o defecto (*azul*) local de carga tras haber extraído un electrón del compuesto. Las imágenes revelaron que las fluctuaciones de carga podían ocurrir en cualquier parte de la biomolécula; un resultado antiintuitivo ya que, en principio, cada grupo de átomos del compuesto presenta una afinidad determinada por los electrones.

Relevancia: Nacimiento de la attoquímica con moléculas complejas. Monitorizar con detalle las fluctuaciones de carga en un compuesto allana el camino para modificar sus propiedades químicas fundamentales.



PARES DE ELECTRONES CORRELACIONADOS

En 2014, una nueva técnica permitió obtener las primeras imágenes del movimiento correlacionado de dos electrones; en este caso, los dos que componen el átomo de helio. Los colores indican la probabilidad de encontrar el primer electrón (*eje vertical*) o el segundo (*eje horizontal*) en una posición dada a lo largo de una línea trazada a través del átomo. En esta secuencia, ambas partículas comienzan su movimiento cerca del núcleo (*centro*); un femtosegundo más tarde, vuelven a su posición original.

Relevancia: El experimento abrió la puerta a controlar los enlaces químicos covalentes, en los que intervienen dos electrones.

FOTOGRAMAS CORTESÍA DEL AUTOR

paquete de ondas electrónico que, en principio, puede moverse a lo largo de toda la molécula.

La película obtenida al usar las «gafas» que resultan de resolver la ecuación de Schrödinger reveló que dichas fluctuaciones de carga eléctrica se producían alrededor de cualquiera de los grupos funcionales del compuesto (los átomos o grupos de átomos que determinan las propiedades principales de la molécula). Además, esas fluctuaciones cambiaban con enorme rapidez. Este resultado es totalmente contraintuitivo, ya que, en general, cada grupo funcional presenta una afinidad distinta por la carga eléctrica, habiendo grupos que muestran una mayor preferencia por alojar un exceso de carga que otros. De hecho, son estas diferencias en la afinidad electrónica las que nos permiten distinguir entre ácidos y bases, o entre oxidantes y reductores. No obstante, estas propiedades aparecen como resultado de un promedio temporal, que es lo que en realidad observamos cuando trabajamos en escalas de tiempo mucho mayores. Nuestros experimentos demostraron que, si somos capaces de resolver con una precisión de attosegundos cómo se distribuye la carga eléctrica en una molécula, los grupos funcionales que en promedio sienten afinidad por la carga negativa pueden albergar transitoriamente una carga positiva, y viceversa.

Esto último abre la puerta a un gran número de posibilidades. Si fuésemos capaces de intervenir durante los breves instantes en los que un grupo de átomos alberga una carga «equivocada», la química resultante sería completamente distinta de la que conocemos. Ello podría aprovecharse para forzar reacciones que no ocurren de forma natural, así como para suprimir otras que sí se producen. Por ejemplo, cabría conseguir que un ácido actuara de manera transitoria como una base o que las bases se comportaran como ácidos.

La dinámica asociada a las fluctuaciones de carga generadas por un pulso de attosegundos depende de las características del pulso, como su ancho de banda. Eso quiere decir que, si lo modificamos, podemos lograr que cambien las propiedades químicas de la molécula, en particular su reactividad. Como mencionábamos antes, la ruptura y la formación de enlaces quedan determinadas por la manera en que se desplazan los electrones. Por tanto, si somos capaces de modificar dicho movimiento, alteraremos también la reactividad del compuesto. Esta estrategia probablemente revista menos dificultad que intentar producir reacciones químicas en aquellos instantes en los que la distribución de carga de la molécula está «equivocada».

MÁS ALLÁ DE ELECTRONES AISLADOS

Un aspecto que hemos pasado por alto es que la misma fuerza de Coulomb que une a un electrón con el núcleo actúa también repulsivamente entre los electrones. En las películas de attosegundos que hemos discutido hasta ahora, los pulsos solo consiguen «poner en marcha» un único electrón, de modo que no es posible analizar en tiempo real el efecto de la repulsión mutua que experimentan dos de ellos. Sin embargo, la repulsión electrostática entre electrones reviste una enorme importancia en la formación de enlaces covalentes. De la misma manera que un pasajero de autobús evita sentarse al lado de otros viajeros o chocarse con ellos cuando camina por el pasillo, también los electrones se esquivan unos a otros cuando se agitan en el interior de una molécula. En jerga técnica, decimos que el movimiento de los electrones se encuentra «correlacionado». Los electrones minimizan así su repulsión mutua y, como consecuencia, contribuyen a estabilizar aún más los enlaces de la molécula.

En 2014 llevamos a cabo un nuevo experimento que, por primera vez, permitió visualizar el movimiento del paquete de ondas resultante de la excitación de dos electrones; en concreto, de los dos que componen un átomo de helio. El montaje experimental, liderado por Thomas Pfeifer, del Instituto Max Planck de Física Nuclear de Heidelberg, también siguió un esquema de bombeo-sonda. Pero, en lugar de detectar electrones e iones, para tomar la fotografía se midió la luz absorbida por el átomo en función del tiempo transcurrido entre el pulso de attosegundos y el pulso sonda. Dado que en este caso la absorción de luz depende del estado de los dos electrones, dicha información permite reconstruir el paquete de ondas asociado a ambas partículas.

Además, el experimento varió la intensidad del pulso sonda a fin de modificar y controlar el movimiento concertado de ambos electrones. Eso abre el camino no solo a la observación directa, sino a domeñar el movimiento de los electrones apareados en un enlace químico. Por último, un trabajo similar efectuado en 2016 y cuya parte experimental fue liderada por Pascal Salières, de la Universidad de París-Saclay, nos permitió observar algo más: el nacimiento de un paquete de ondas electrónico, desde la interacción entre el átomo y el pulso de attosegundos hasta que el sistema alcanzó un régimen estable.

Gracias al descubrimiento de los pulsos de luz de attosegundos, en los últimos años hemos comenzado a visualizar y controlar el movimiento de los electrones en el seno de átomos y moléculas. Las investigaciones efectuadas hasta ahora han demostrado que esta técnica puede aplicarse tanto a moléculas sencillas como a otras mucho más complejas y de interés biológico. Sumado a los espectaculares avances en la visualización de paquetes de onda electrónicos, todo ello ha dado lugar al nacimiento de una nueva disciplina: la attoquímica, basada en el uso de láseres de attosegundos y en la supercomputación. Por primera vez en la historia, nos hallamos ante la posibilidad de modificar las propiedades químicas y el comportamiento de las moléculas. A pesar de los retos científicos y técnicos aún pendientes, no cabe duda de que todos estos avances auguran un impacto enorme en la química de los próximos años. IyC

PARA SABER MÁS

Attosecond metrology. M. Hentschel et al en *Nature*, vol. 414, págs. 509-513, noviembre de 2001.
Attosecond science. P. B. Corkum y F. Krausz en *Nature Physics*, vol. 3, págs. 381-387, junio de 2007.
Electron localization following attosecond molecular photoionization. G. Sansone et al. en *Nature*, vol. 465, págs. 763-766, junio de 2010.
Ultrafast electron dynamics in phenylalanine initiated by attosecond pulses. F. Calegari et al. en *Science*, vol. 346, págs. 336-339, octubre de 2014.
Reconstruction and control of a time-dependent two-electron wave packet. C. Ott et al. en *Nature*, vol. 516, págs. 374-378, diciembre de 2014.
Attosecond dynamics through a Fano resonance: Monitoring the birth of a photoelectron. V. Gruson et al. en *Science*, vol. 354, págs. 734-738, noviembre de 2016.
Attosecond electron dynamics in molecules. [PDF] M. Nisoli et al. en *Chemical Reviews*, vol. 117, págs. 10.760-10.825, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Microscopía electrónica ultrarrápida. Ahmed H. Zewail en *IyC*, octubre de 2010.
Electrónica con pulsos de luz. Martin Schultze y Ferenc Krausz en *IyC*, mayo de 2015.
Filmar el movimiento de las moléculas. Petra Fromme y John C. H. Spence en *IyC*, julio de 2017.

ESPECIAL

MONOGRÁFICOS DIGITALES

Hasta el 6 de enero
–15 %
(Ver detalles en la página 10)



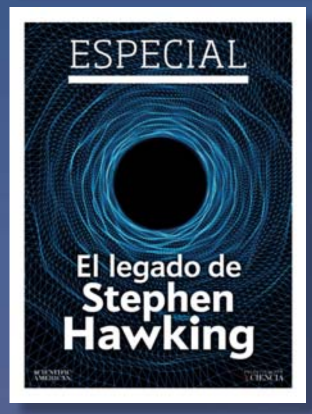






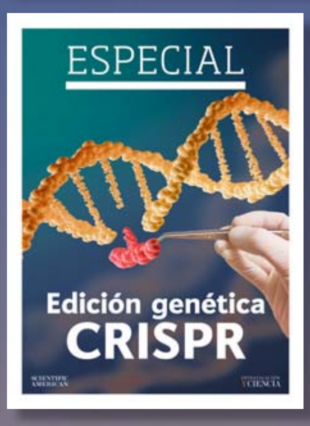




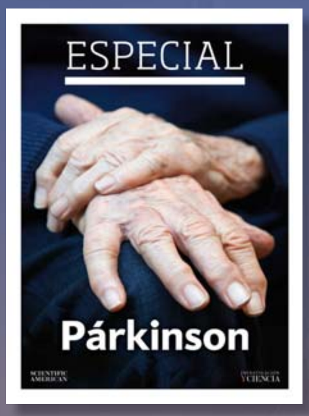












Descubre los monográficos digitales que reúnen nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial



INFORME ESPECIAL



LA CIENCIA DE LA DESIGUALDAD

Una acusada desigualdad económica repercute negativamente en todos los aspectos del bienestar humano y en la salud de la biosfera. En contra de lo que cabría esperar, la desigualdad no perjudica solo a los más pobres, sino también a las clases ricas y medias. En el presente informe, destacados investigadores analizan sus causas y el alcance de las consecuencias.

El economista Joseph E. Stiglitz explica el origen de la desigualdad en EE.UU., país que representa el caso extremo de una tendencia global. La politóloga Virginia Eubanks describe el modo en que los sistemas digitales a menudo perjudican, en lugar de ayudar, a los miembros más vulnerables de la sociedad. El neurólogo Robert M. Sapolsky detalla los mecanismos por los que la desigualdad deteriora la salud mental y física de los individuos, y el economista James K. Boyce analiza la manera en que el desequilibrio económico y político está dañando el entorno natural.

ANDREA UCINI





ANDREA UCINI



LA DESIGUALDAD EN EE.UU.

Análisis de un caso extremo para entender las causas de una tendencia global

Joseph E. Stiglitz

Los estadounidenses suelen pensar que su país es especial. Y en muchos aspectos lo es: tiene con diferencia el mayor número de premios nóbel, el mayor gasto en defensa (casi tanto como los diez países siguientes juntos) y la mayor cantidad de multimillonarios (el doble que China, su más cercano competidor). Pero algunos ejemplos de su excepcionalidad no son motivo de orgullo. Todo indica que su nivel de desigualdad económica supera al del resto de los países desarrollados. Presenta el mayor gasto sanitario per cápita del mundo, pero la menor esperanza de vida de entre las naciones con las que puede equipararse. Y es también uno de los pocos países desarrollados que compite por el dudoso honor de mostrar los peores indicadores en igualdad de oportunidades.

El «sueño americano» (la idea de que, a diferencia de Europa, EE.UU. es una tierra de oportunidades) forma parte de la esencia del país. Pero las cifras indican lo contrario. Las perspectivas de un joven estadounidense dependen más de los ingresos y la educación de sus padres que en casi cualquier otro país avanzado del mundo. Cuando en los medios de comunicación circulan anécdotas sobre «el chico pobre que llega alto», es precisamente porque tales historias resultan excepcionales.

Pero parece que las cosas van a peor. Ello se debe en parte a fuerzas como la tecnología y la globalización, las cuales se antojan ajenas a nuestro control. Pero, sobre todo —y esto es lo más inquietante—, obedece a causas que sí dependen de nosotros. No son las leyes de la naturaleza las que nos han abocado a esta penosa situación: son las leyes de la humanidad. Los mercados no existen en un vacío; quedan definidos por regulaciones que pueden diseñarse para favorecer a un grupo a costa de otro. El presidente de EE.UU., Donald Trump, tenía razón al decir que el sistema está amañado: lo está por quienes forman parte de una plutocracia heredada a la que él mismo pertenece.

EE.UU. supera desde hace tiempo a otros países en nivel de desigualdad, pero ha alcanzado nuevas cotas en los últimos cuarenta años. Mientras que los ingresos del 0,1 por ciento más rico se han más que cuadruplicado, y los del 1 por ciento casi se han duplicado, los del 90 por ciento inferior han disminuido. Los salarios más bajos, ajustados por la inflación, siguen siendo casi los mismos desde hace 60 años. De hecho, los ingresos de aquellos con educación secundaria o inferior han ido cayendo en las últimas décadas. La población masculina, en concreto, ha salido especialmente perjudicada, a medida que EE.UU. abandonaba las fábricas por una economía de servicios.

EN SÍNTESIS

En los últimos años, el cambio tecnológico, la globalización y otras causas han provocado un aumento de la desigualdad en las economías avanzadas.

Esos factores son mundiales. En EE.UU., sin embargo, la desigualdad económica ha aumentado más que en casi cualquier otro país desarrollado. ¿A qué se debe?

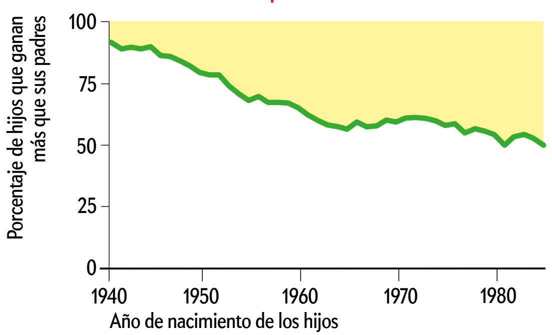
Las clases pudientes estadounidenses han adquirido un poder excesivo para modificar leyes en beneficio propio. Romper ese círculo exigirá limitar la influencia del dinero en la política.

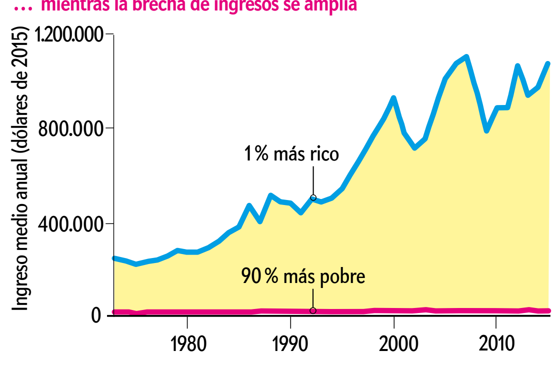


Joseph E. Stiglitz recibió el premio Nobel de economía en 2001. Es catedrático de la Universidad de Columbia y economista jefe del Instituto Roosevelt, en Nueva York. Presidió el Consejo de Asesores Económicos de EE.UU entre 1995 y 1997 y fue economista jefe y primer vicepresidente del Banco Mundial de 1997 a 2000. También ha presidido la comisión de las Naciones Unidas sobre la reforma del sistema financiero internacional en 2008-09.

EL FIN DEL SUEÑO AMERICANO

Contra la creencia popular, la igualdad de oportunidades en EE.UU. es menor que en la mayoría de los países avanzados. Un informe de 2017 del economista Raj Chetty y sus colaboradores, indicaba que un estadounidense nacido en 1940 podía estar casi seguro de que acabaría viviendo mejor que sus padres. Sin embargo, uno nacido en 1980 tiene un 50 por ciento de probabilidades de terminar peor que sus progenitores. Esta merma de la igualdad de oportunidades se debe en gran parte al alto coste de la educación superior y a la espiral de desigualdad económica. La Base de Datos sobre la Desigualdad Mundial (https://wid.world) muestra que, desde 1970, los ingresos del 1 por ciento más rico, corregidos por la inflación, se han cuadruplicado, mientras que los del 90 por ciento más pobre se han estancado. En particular, los hombres sin educación superior han visto disminuir sus ingresos.





FUENTES: «THE FADING AMERICAN DREAM: TRENDS IN ABSOLUTE INCOME MOBILITY SINCE 1940», RAJ CHETTY ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 356, ABRIL DE 2017 (*riqueza de padres e hijos*); BASE DE DATOS SOBRE LA DESIGUALDAD MUNDIAL, HTTPS://WID.WORLD (*ingresos del 1% y el 90%*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

MUERTES POR DESESPERACIÓN

La distribución de la riqueza es incluso más desigual: las posesiones de tan solo tres estadounidenses equivalen a las del 50 por ciento de los más desfavorecidos, una cifra que refleja cuánto tienen los de arriba y cuán poco los de abajo. El 50 por ciento de las familias apenas cuenta con ahorros suficientes para afrontar una emergencia. Los periódicos están repletos de historias de ciudadanos a quienes una avería del coche o una enfermedad les han sumido en una espiral descendente de la que no se recuperan.

Debido en buena parte a esa enorme desigualdad, la esperanza de vida en EE.UU., ya de por sí baja, está experimentando descensos sostenidos. Y ello a pesar de las maravillas de la medicina, muchos de cuyos avances tienen lugar en EE.UU. y enseguida se ponen a disposición de los más ricos. La economista Anne Case y el premio nóbel de economía de 2015 Angus Deaton describen una de las principales causas del incremento de la mortalidad (el aumento del alcoholismo, la drogadicción y los suicidios) como «muertes por desesperación», la de aquellos que han abandonado toda esperanza.

Los defensores de la desigualdad ofrecen una explicación simplista. Aluden al funcionamiento de un mercado competitivo, donde las leyes de la oferta y la demanda determinan los salarios, los precios e incluso los tipos de interés. Un sistema mecánico, muy parecido al que describe el universo físico. Argumentan que aquellos con pocas capacidades o recursos quedan ampliamente recompensados debido a su gran aportación a la economía. Lo que reciben representa lo que han contribuido. Y a menudo extraen menos de lo que han aportado, así que ese gran sobrante queda para los demás.

Ese relato de ficción tal vez haya mitigado la culpa de los más pudientes y persuadido a los demás de aceptar este lamentable estado de las cosas. Quizás el momento revelador del engaño fue la crisis financiera de 2008, cuando los banqueros que casi arruinaron la economía mundial con préstamos abusivos, manipulaciones del mercado y otras prácticas antisociales se marcharon con millones de dólares en bonos al tiempo que millones de personas perdían su trabajo y vivienda, y decenas de millones más en todo el mundo sufrían por su culpa. A casi ninguno de esos banqueros se le responsabilizó de sus felonías.

Fui consciente de la naturaleza fantástica de este relato siendo todavía un colegial, cuando pensaba en la riqueza de los propietarios de las plantaciones erigidas sobre las espaldas de los esclavos. En el momento de la guerra civil estadounidense, el valor de mercado de los esclavos del sur equivalía a casi la mitad de la riqueza total de la región, incluida la tierra y el capital físico (fábricas y equipamiento). La riqueza de al menos esa parte de la nación no provenía de la industria, la innovación y el comercio, sino de la explotación. Hoy hemos reemplazado aquel expolio manifiesto con versiones más arteras, las cuales se han intensificado desde la era de Ronald Reagan y Margaret Thatcher en los años ochenta. A continuación argumentaré que esa explotación es en buena parte responsable de la creciente desigualdad actual.

Tras el Nuevo Trato (la política intervencionista del Gobierno de EE.UU. tras la Gran Depresión de 1929), la desigualdad comenzó a disminuir. Hacia 1950 había retrocedido tanto que otro nóbel de economía, Simon Kuznets, formuló la siguiente ley: en los primeros estadios de desarrollo, cuando algunas partes de un país aprovechan las nuevas oportunidades, las desigualdades crecen; sin embargo, en las etapas posteriores se reducen. Su teoría encajó con los datos durante largo tiempo. Pero después, en los años ochenta, la tendencia se invirtió de golpe.

EXPLICAR LA DESIGUALDAD

Los economistas han esgrimido varios argumentos para explicar por qué la desigualdad ha ido aumentando en numerosos países desarrollados. Algunos sostienen que los avances tecnológicos han incentivado la demanda de mano de obra cualificada en detrimento de la no cualificada, debilitando así los salarios de esta última. Pero, por sí solo, eso no puede explicar por qué también a la mano de obra cualificada le ha ido tan mal en las últimas dos décadas, por qué el salario medio ha salido tan malparado, ni por qué la situación es peor en EE.UU. que en otras naciones desarrolladas. Los cambios tecnológicos son mundiales y deberían haber afectado por igual a todas las economías avanzadas.

Otros culpan a la globalización de haber debilitado el poder de los trabajadores: las empresas pueden mudarse a otro país y, de hecho, lo hacen si los trabajadores no aplacan sus exigencias. Sin embargo, la globalización ha sido un fenómeno de todas las economías avanzadas. ¿Por qué su impacto es mucho mayor en EE.UU.?



El cambio de una economía manufacturera a otra basada en servicios tiene su parte de culpa. En el caso extremo (la empresa de una persona) la economía de servicios es un «todo para el ganador». Así, una estrella de cine puede cobrar millones mientras la mayoría de los actores se conforma con una miseria. En una economía de servicios los salarios tienden a estar mucho más dispersos que en una industrial, de modo que la transición de una a otra aumenta la desigualdad. Con todo, ello no explica por qué el salario medio en EE.UU. no ha mejorado en décadas. Además, el cambio al sector servicios está produciéndose en la mayoría de los países desarrollados. ¿Por qué las cosas van mucho peor en EE.UU.?

Dado que los servicios suelen proporcionarse a nivel local, las empresas adquieren un mayor poder de mercado; es decir, una mayor capacidad para subir sus precios por encima de lo que imperaría en un mercado competitivo. Si una ciudad pequeña cuenta con un solo taller de Toyota, casi todos los dueños de esos vehículos estarán obligados a acudir a él. Los proveedores podrán así aumentar los precios, los beneficios y la parte que corresponde a propietarios y gerentes. Eso también acrecienta la desigualdad. Pero, una vez más, ¿por qué destaca EE.UU.?

En su famoso libro de 2013 *El capital en el siglo XXI*, el economista francés Thomas Piketty apunta a los capitalistas. Sugiere que los pocos que poseen la gran parte del capital de un país ahorran tanto que, dada la elevada rentabilidad del capital en comparación con la tasa de crecimiento de la economía, cada vez poseen una fracción mayor de la renta nacional. Sin embargo, se han cuestionado numerosos aspectos de la teoría de Piketty. Por ejemplo, la tasa de ahorro de los más acaudalados de EE.UU. es tan baja comparada con la de los ricos de otros países que, de ocurrir así, el aumento de la desigualdad tendría que ser menor en EE.UU., no mayor.

Existe una teoría alternativa mucho más acorde con los hechos. Desde mediados de los años setenta, las reglas del juego económico global y nacional se han reescrito de manera que favorecen a los más ricos y perjudican al resto. Y en esta tendencia perversa, EE.UU. ha llegado más lejos que otros países desarrollados, a pesar de que las reglas de partida ya eran más desfavorables para los trabajadores. Desde esta perspectiva, el aumento de la desigualdad es una cuestión de elección: una consecuencia de nuestras políticas, leyes y regulaciones.

En EE.UU., el poder de mercado de las grandes corporaciones, que ya era superior al de la mayoría de los países avanzados, ha aumentado más que en otros lugares. Y el de los trabajadores, que era inferior al de la gran parte de las economías desarrolladas, ha caído más que en otras partes del mundo. Ello no obedece solo a la transición hacia una economía de servicios, sino a unas reglas de juego amañadas. Unas reglas establecidas en un sistema político con circunscripciones electorales manipuladas, en el que el votante pierde poder y el dinero gana influencia. Se ha creado así una espiral perversa: la desigualdad económica se traduce en desigualdad política, la cual deriva en reglas que benefician a los ricos, lo que a su vez refuerza la desigualdad económica.

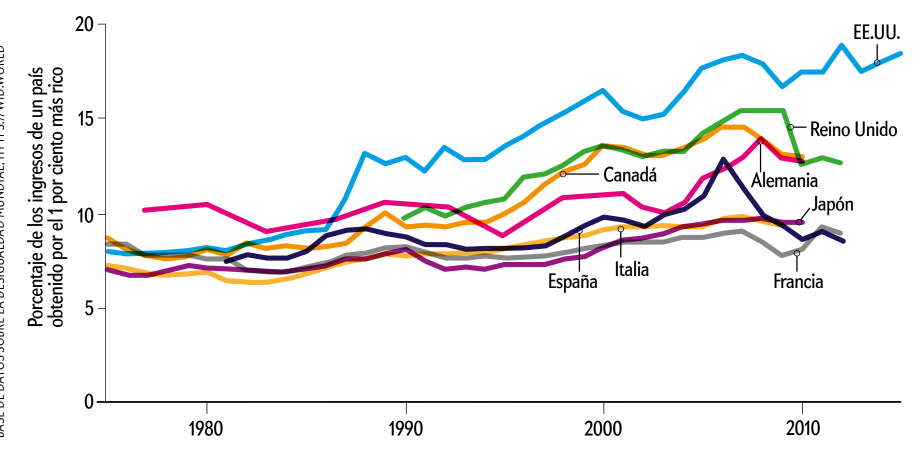
BUCLE DE RETROALIMENTACIÓN

Los politólogos han documentado la manera en que el dinero influye en las decisiones políticas y convierte la desigualdad económica en una mayor desigualdad política. Esta, a su vez, provoca más desigualdad económica, ya que los ricos usan su poder político para aprobar leyes que les favorecen, como moderar las normas antimonopolio o debilitar a los sindicatos. A partir de modelos matemáticos, varios economistas hemos demostrado que este bucle de retroalimentación entre dinero y legislación conduce a, al menos, dos estados de equilibrio. Si una economía parte de una desigualdad baja, el sistema político genera reglas que la mantienen, con lo que se alcanza un punto de equilibrio. Pero el sistema estadounidense corresponde al equilibrio opuesto, y continuará así hasta que surja un despertar político democrático.

Para explicar cómo se han configurado estas reglas hemos de remontarnos a las leyes antimonopolio, promulgadas por primera vez en EE.UU. hace 128 años para prevenir la acumulación de poder de mercado. Su aplicación se ha debilitado en un momento en el que tendrían que haberse reforzado. Los cambios tecnológicos han concentrado el poder de mercado en manos de unos pocos actores internacionales, en parte debido a los denominados «efectos de red»: una persona es más proclive a unirse a una red social concreta o a usar un cierto procesador de textos si todo el mundo que conoce ya lo usa. Una vez que empresas como Facebook o Microsoft se han establecido, resulta difícil desbancarlas. Además, los costes fijos, como el desarrollo de un nuevo programa informático, han aumentado en comparación con los marginales (los asociados a hacer copias de ese mismo programa). Una nueva empresa ha de asumir todos esos gastos fijos por adelantado. Y, si

TENDENCIAS GLOBALES

La desigualdad ha aumentado en la mayoría de los países avanzados debido a factores como la globalización, el cambio tecnológico y la transición hacia una economía de servicios. Sin embargo, según la Base de Datos sobre la Desigualdad Mundial, el incremento ha sido mayor en Estados Unidos. El fenómeno obedece a un giro político: la legislación ha permitido que las grandes empresas acumulen cada vez más poder de mercado al tiempo que los trabajadores perdían influencia. La fiscalidad y otras medidas han favorecido sistemáticamente a los más ricos.



FUENTES: *ECONOMIC REPORT OF THE PRESIDENT*, CONSEJO DE ASESORES ECONÓMICOS DE EE.UU., 2017; BASE DE DATOS SOBRE LA DESIGUALDAD MUNDIAL, HTTPS://WID.WORLD



consigue incorporarse al mercado, la gran compañía ya establecida puede responder bajando drásticamente sus precios, ya que el coste de fabricar un libro electrónico adicional o un programa de edición de fotografías es esencialmente cero.

En resumen, entrar es difícil y arriesgado, lo que otorga a las empresas ya asentadas un poder enorme para aplastar a sus competidores y, en último término, subir los precios. Para empeorar las cosas, las empresas estadounidenses no solo han innovado en sus productos, sino también en los modos de ampliar su poder de mercado. La Comisión Europea ha impuesto multas milmillonarias a Microsoft y Google y les ha obligado a frenar sus prácticas monopolísticas (como la de Google de privilegiar a su propio servicio de comparación de precios). Pero EE.UU. ha hecho muy poco por controlar la concentración de poder de mercado, por lo que no es de extrañar que en muchos sectores esta haya aumentado.

Este amaño de las reglas explica también por qué el impacto de la globalización puede haber sido más fuerte en Estados Unidos. Un ataque concertado a los sindicatos ha reducido a casi la mitad el porcentaje de trabajadores sindicados en el país, hoy en un 11 por ciento, frente al 70 por ciento de regiones como Escandinavia. Unos sindicatos débiles proporcionan menos protección al trabajador contra el deterioro de las condiciones laborales. Además, los acuerdos como el Tratado de Libre Comercio de América del Norte —que se presentaron como un modo de prevenir que países extranjeros discriminaran a las empresas estadounidenses— también protegen a los inversores frente a las legislaciones ambientales y sanitarias de otras naciones, donde son más estrictas. Por ejemplo, hoy una corporación puede demandar a un país ante un comité privado de arbitraje por haber aprobado leyes que protegen a los ciudadanos y al entorno pero que amenazan el balance de la compañía. Las empresas ven con buenos ojos estas disposiciones, pues hacen más creíbles las amenazas de una compañía de mudarse al extranjero si los trabajadores no moderan sus demandas. En resumen, tales tratados han debilitado aún más el poder negociador de los trabajadores.

FINANZAS LIBERADAS

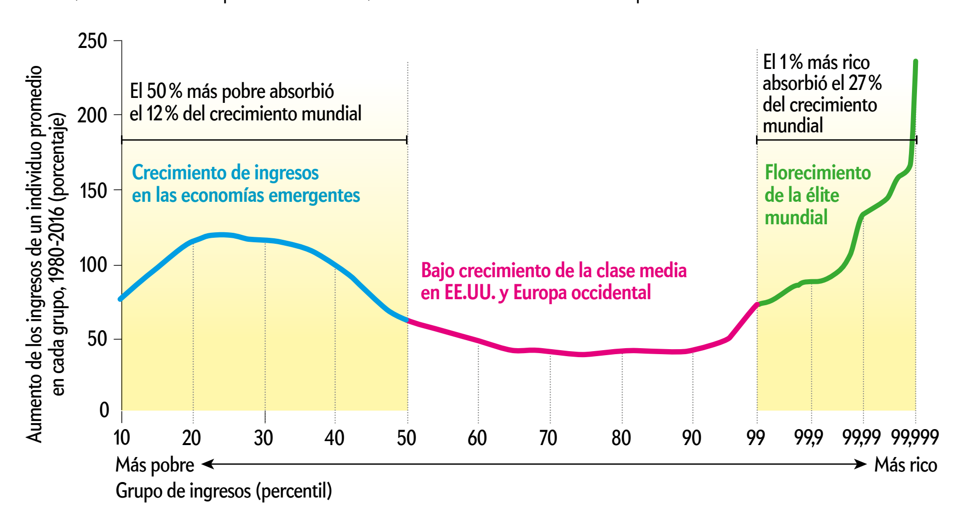
Son muchos los cambios en las leyes que han exacerbado la desigualdad. Unos controles flojos en las normas de gestión empresarial han permitido que los altos ejecutivos se asignen retribuciones hasta 361 veces superiores a las del trabajador medio, una desproporción mucho mayor que en otros países desarrollados. La liberalización financiera (la supresión de regulaciones pensadas para impedir que el sector financiero perjudique al resto de la sociedad, como ocurrió en la crisis de 2008) ha posibilitado el crecimiento de la industria financiera en tamaño y beneficios, al tiempo que ha ampliado sus oportunidades de explotar al resto. Los bancos se entregan a prácticas que son legales pero que no deberían serlo, como imponer tipos de interés abusivos a prestatarios, tasas exorbitantes por tarjetas de crédito, o crear productos financieros diseñados para quebrar. A menudo cometen también ilegalidades, incluida la manipulación del mercado y el uso de información privilegiada. Con ello, el sector financiero ha transferido dinero del ciudadano medio a los banqueros y sus accionistas. Esta forma de redistribución de riqueza ha elevado de forma considerable la desigualdad en EE.UU.

Otros métodos de extracción de rentas (apropiarse de una porción de la tarta nacional que no guarda relación con los aportes a la sociedad) abundan. Una ley de 2003 prohibía al Gobierno negociar los precios de los fármacos de Medicare (la cobertura sanitaria para mayores de 65 años y otras personas): un regalo de 500 millones de dólares anuales o más para la industria farmacéutica. Otro ejemplo lo hallamos en las industrias que reciben favores para extraer recursos públicos, como petróleo, a un coste inferior al de un mercado justo; o el de los bancos que obtienen dinero de la Reserva Federal a un interés casi nulo para después prestarlo caro. Y el trato favorable que reciben los más ricos a la hora de pagar impuestos exacerba aún más la desigualdad. En EE.UU., los más acaudalados pagan en impuestos una fracción de sus ingresos menor que quienes son mucho más pobres.

Algunos economistas defienden que solo podemos reducir la desigualdad si acabamos con el crecimiento y la eficiencia. Pero investigaciones recientes, como la de Jonathan Ostry y sus colaboradores del Fondo Monetario Internacional, sugieren que las economías más igualitarias funcionan mejor, crecen más y gozan de un mejor nivel de vida y de una mayor estabilidad. La desigualdad extrema de EE.UU. y la manera en la que se genera perjudica a la economía del país. La explotación del poder de mercado y demás distorsiones tornan menos eficientes los mercados y minan la producción de bienes valiosos, como la investigación básica, en favor de otros, como los productos financieros abusivos.

DESEQUILIBRIO DEL CRECIMIENTO MUNDIAL

La globalización ha beneficiado a millones de pobres de naciones emergentes, sobre todo en China. Sin embargo, los datos del economista Branko Milanovic recogidos en el *Informe sobre la desigualdad mundial 2018* muestran que, entre 1980 y 2016, las ganancias más pronunciadas han sido las del 1 por ciento más rico, el cual ha absorbido más de la cuarta parte del crecimiento mundial. Según un informe de 2018 de la organización Oxfam, 42 individuos acumulan tanta riqueza como el 50 por ciento más pobre de la humanidad. Las clases medias de EE.UU. y Europa occidental, así como los más pobres del mundo, han sido los menos beneficiados por el crecimiento mundial.



FUENTES: *WORLD INEQUALITY REPORT 2018*, BASE DE DATOS SOBRE LA DESIGUALDAD MUNDIAL, HTTPS://WID.WORLD; BRANKO MILANOVIC

Además, dado que los ricos suelen dedicar al consumo de bienes un porcentaje de sus ingresos menor que los pobres, la demanda total en países con una mayor desigualdad es más débil. Una sociedad podría mitigar esta brecha aumentando el gasto gubernamental en infraestructuras, educación y salud, todas ellas inversiones necesarias para el crecimiento a largo plazo. Pero las políticas de las sociedades desiguales suelen concentrarse en aspectos monetarios, como bajar los tipos de interés para estimular el gasto. Y unos tipos de interés artificialmente bajos, sobre todo si se combinan con una mala regulación financiera, a menudo crean burbujas, como ocurrió con la crisis inmobiliaria de 2008.

No es de extrañar que, de media, la gente que vive en sociedades desiguales tenga también menos igualdad de oportunidades: los menos favorecidos nunca consiguen la educación que les permitiría desarrollar todo su potencial. Ello eleva a su vez la desigualdad, al tiempo que desperdicia el recurso más valioso del país: las personas.

RESTITUIR LA JUSTICIA

La confianza se resiente en las sociedades desiguales, especialmente cuando la desigualdad se percibe como injusta. Y esa sensación de engaño se traduce en una menor productividad. Cuando los propietarios de los casinos ganan incalculables veces más que los científicos que nos han brindado los láseres, los transistores y el entendimiento del ADN, está claro que algo no funciona. Además, los hijos de los más ricos acaban considerándose una clase aparte, con derecho a su buena fortuna y, en consecuencia, más autorizados a saltarse las reglas que hacen que una sociedad funcione. Todo ello contribuye a la quiebra de la confianza, con sus consiguientes repercusiones en la cohesión social y el rendimiento económico.

No hay una fórmula mágica para remediar un problema tan arraigado como la desigualdad en Estados Unidos. Sus orígenes son, sobre todo, políticos, por lo que resulta difícil imaginar un cambio sin un esfuerzo concertado para alejar el dinero de la política (por ejemplo, reformando la financiación de las campañas electorales). Bloquear las puertas giratorias por las que los funcionarios del Gobierno entran y salen de las mismas industrias que regulan es también esencial.

Más allá, son necesarios unos impuestos más progresivos y una educación pública de calidad, que incluya un acceso a la universidad asequible para todos sin necesidad de endeudarse hasta la ruina. Hacen falta leyes de competencia modernas para lidiar con los problemas que plantea el poder de mercado en el siglo XXI, así como una aplicación más rigurosa de las regulaciones existentes. Son imprescindibles una legislación laboral que proteja a los trabajadores y su derecho a sindicarse; leyes de gobernanza empresarial que restrinjan los sueldos exorbitantes de los altos ejecutivos, y una regulación financiera más estricta que impida que los bancos se embarquen en las prácticas abusivas que se han convertido en su sello. Necesitamos una mejor aplicación de las leyes antidiscriminación, ya que es inadmisible que las mujeres y las minorías cobren una fracción de lo que reciben sus homólogos hombres y blancos, así como una ley de sucesiones que merme la transmisión de privilegios y desventajas entre generaciones.

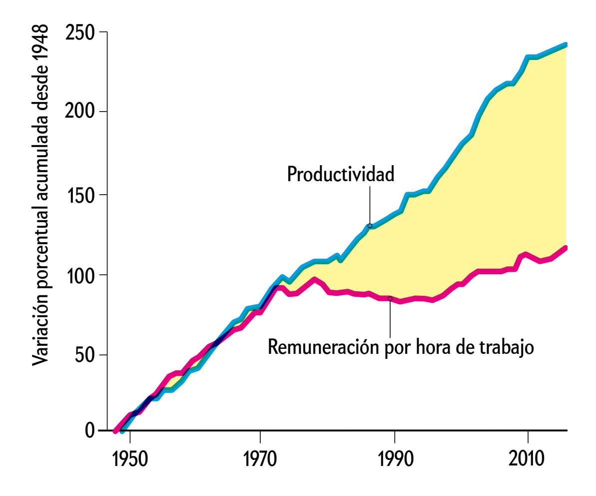
Los beneficios básicos de la clase media, entre ellos la seguridad de una vejez digna, ya no son asequibles para la mayoría de los estadounidenses. Ha de garantizarse el acceso a la atención sanitaria. Deben reforzarse y reformarse los programas de jubilación, que han cargado sobre los trabajadores la tarea de gestionar el riesgo (se espera que administren sus carteras de valores para protegerse a la vez de los riesgos de la inflación y del desplome del mercado) y les han expuesto a la explotación por parte del sector financiero (que les vende productos diseñados para maximizar las comisiones bancarias en vez de la seguridad en la jubilación). El sistema hipotecario era un talón de Aquiles, pero en realidad no se ha corregido. Con el porcentaje tan alto de la población que habita en ciudades, hace falta una política de vivienda que garantice un hogar asequible para todos.

Se trata de una agenda amplia pero factible. Cuando los escépticos afirman que es correcta pero inviable, respondo: lo que no es viable es *no* hacer todo esto. Ya estamos pagando un precio muy alto por la desigualdad, pero eso no es más que un anticipo de lo que habremos de soportar si no actuamos rápido. No es solo la economía la que está en juego, sino la misma democracia.

A medida que aumenta el número de ciudadanos que entiende por qué el fruto del progreso económico se ha repartido de forma tan desigual, existe el peligro real de que sigan a un demagogo que culpe a terceros de los problemas del país y haga falsas promesas de rectificar «un sistema amañado». Ya estamos experimentando un anticipo de lo que puede ocurrir. Podría ser mucho peor.

BRECHA SALARIAL EN EE.UU.

Según Josh Bivens y sus colaboradores del Instituto de Política Económica, en Washington, la productividad de los trabajadores estadounidenses se ha duplicado desde 1980. Sin embargo, el salario de la mano de obra se ha estancado, lo que ha transferido casi todas las ganancias derivadas de la productividad a inversores y propietarios. Entre 1979 y 2012, los sueldos del 1 por ciento más acaudalado, como financieros y altos ejecutivos, han aumentado en más del 150 por ciento. Ese incremento en la brecha salarial ejerce una fuerte influencia en la espiral de desigualdad.



FUENTES: *RAISING AMERICA'S PAY: WHY IT'S OUR CENTRAL ECONOMIC POLICY CHALLENGE*, JOSH BIVENS ET AL., INSTITUTO DE POLÍTICA ECONÓMICA, JUNIO DE 2014; *THE STATE OF WORKING AMERICA*, LAWRENCE MISHEL, JOSH BIVENS, ELISE GOULD Y HEIDI SHIERHOLZ, 12.ª EDICIÓN, ILR PRESS, 2012

PARA SABER MÁS

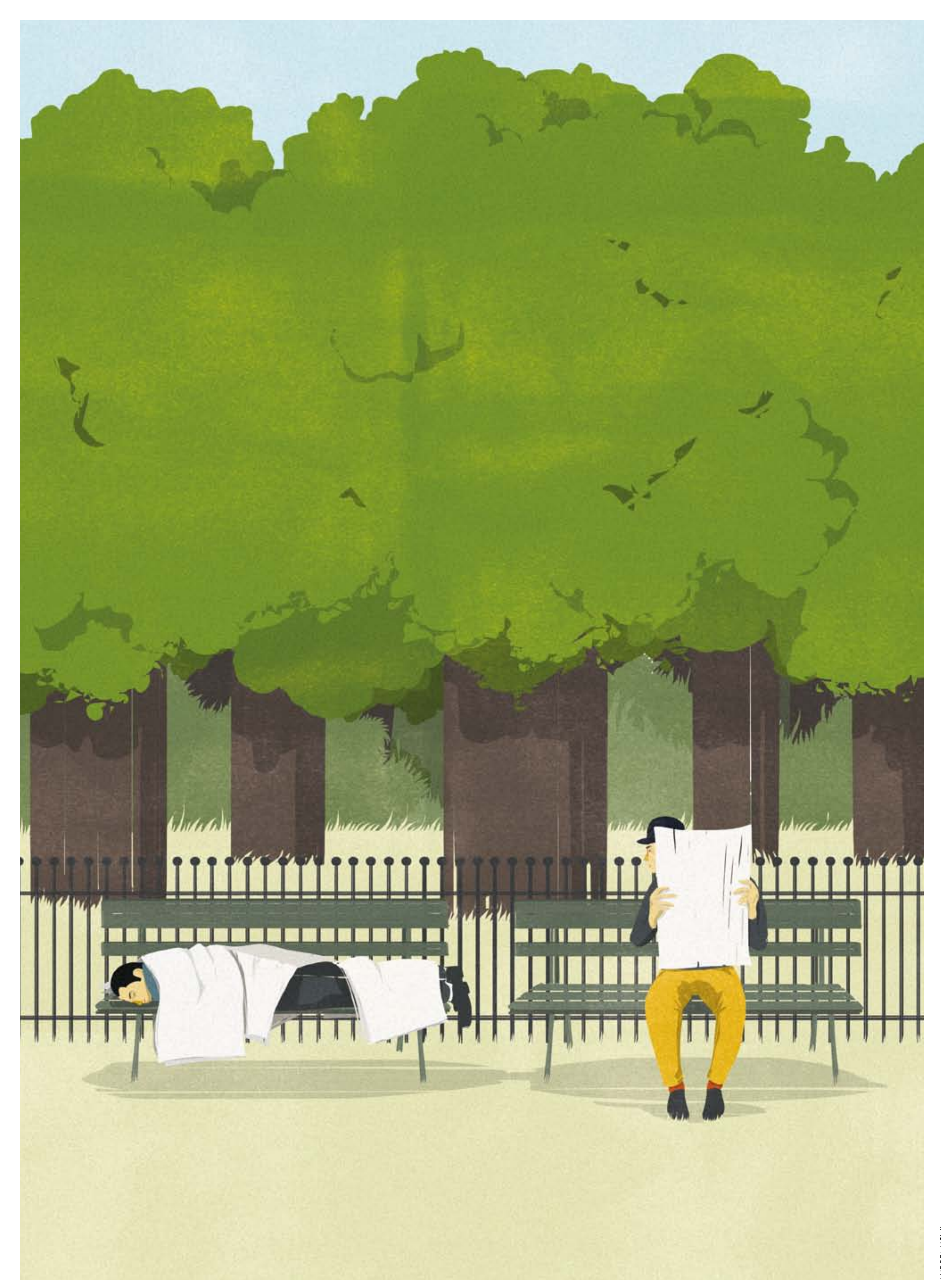
El precio de la desigualdad: El 1% de la población tiene lo que el 99% necesita. Joseph Stiglitz. Editorial Taurus, 2012.

La gran brecha: Qué hacer con las sociedades desiguales. Joseph Stiglitz. Editorial Taurus, 2015.

El malestar en la globalización, revisitado. Joseph Stiglitz. Editorial Taurus, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La amenaza de la desigualdad. Angus Deaton en *IyC*, noviembre de 2016.



ANDREA UCINI



DESIGUALDAD ECONÓMICA Y SALUD PÚBLICA

La creciente brecha que separa a ricos y pobres deja secuelas en el cuerpo y en el cerebro *Robert M. Sapolsky*

Las culturas occidentales abrazan desde hace tiempo la idea de que todos nacemos iguales. Pero en la vida real, nuestra existencia no se caracteriza por la igualdad de oportunidades y de recursos. Esa disparidad ya la señaló mordazmente en 1894 el escritor Anatole France: «La ley, en su magnífica ecuanimidad, prohíbe, tanto al rico como al pobre, dormir bajo los puentes, mendigar por las calles y robar pan». Por supuesto, los pudientes no precisan nada de eso, pero los necesitados a menudo no tienen otra elección. La desigualdad económica no ha hecho sino empeorar a lo largo de las décadas pasadas, sobre todo en Estados Unidos: en 1976, el 1 por ciento más rico poseía el 9 por ciento de la riqueza del país; hoy atesora casi el 24 por ciento. Y esa tendencia se repite en todo el mundo.



Robert M. Sapolsky es profesor de ciencias biológicas y neurológicas en la Universidad Stanford e investigador de los Museos Nacionales de Kenia. Su trabajo en el laboratorio gira en torno al daño causado por el estrés en el cerebro y la aplicación de la terapia génica en el sistema nervioso. Además, estudia en papiones del este de África la relación entre el rango social y la salud.

Una de las consecuencias del auge de la pobreza es el deterioro de la salud, si bien los motivos no son tan obvios como puede parecer. En efecto, pertenecer a un nivel socioeconómico (NSE) bajo conlleva en EE.UU. un acceso más limitado a la asistencia sanitaria y vivir en entornos más propensos a la enfermedad. Y puesto que los peldaños inferiores de la escala socioeconómica están ahora más concurridos, el número de personas con problemas de salud ha aumentado. Pero no se trata de un mero problema de mala salud para el pobre y de mejor salud para los demás. Desde Jeff Bezos, director de Amazon, para abajo, cada peldaño que descendemos por la escala conlleva un empeoramiento de la salud.

El vínculo entre la desigualdad socioeconómica y la mala salud va más allá del acceso a la asistencia sanitaria y de convivir con más peligros. Menos de la mitad de los cambios de salud que se suceden a lo largo de la escala del NSE se explican por riesgos como fumar, beber alcohol o consumir comida rápida, o por factores beneficiosos como disponer de seguro médico o estar abonado a un gimnasio. Los extensos Estudios Whitehall sobre riesgos en colectivos concretos, dirigidos por el epidemiólogo Michael Marmot, lo demuestran a

EN SÍNTESIS

La desigualdad socioeconómica conlleva condiciones deficientes de salud y muertes prematuras, pero no solo debido al menor acceso a la asistencia sanitaria y a la peor alimentación.

Estudios recientes demuestran que una brecha más profunda entre ricos y pobres causa un aumento del desgaste corporal debido al estrés crónico.

El estrés psicosocial afecta al cuerpo de tres formas: la inflamación persistente, la destrucción de elementos cromosómicos fundamentales y el deterioro de ciertas regiones cerebrales.



las claras. Además, esa escala, o pirámide, existe en los países con asistencia sanitaria universal; si el acceso a la asistencia fuera realmente el responsable, su universalidad haría desaparecer las diferencias de salud. Algo más, bastante poderoso, debe ir aparejado con las desigualdades y ser capaz de causar enfermedades.

Ese factor parece radicar en las estresantes consecuencias psicosociales que acarrea pertenecer a un NSE desfavorable. La psicóloga Nancy Adler, de la Universidad de California en San Francisco (UCSF), y sus colaboradores han demostrado que la valoración que hacen las personas de cómo les va, en comparación con el prójimo, es como mínimo tan predictora de la salud o de la enfermedad como cualquier otro baremo objetivo, como el nivel de ingresos. Las investigaciones indican que la salud del pobre no depende tanto de serlo como de creer serlo. Los epidemiólogos Richard Wilkinson y Kate Pickett, de la Universidad de Nottingham y la Universidad de York, respectivamente, han completado este panorama de la pobreza con detalle y han demostrado que, si bien esta por sí sola resulta perjudicial para la salud, la pobreza en medio de la abundancia (inequidad) tiene peores consecuencias sobre cualquier otra medida: mortalidad infantil, esperanza de vida, obesidad, muerte violenta, y más. Aquello que mina especialmente la salud es ver ante las propias narices todo lo que no se tiene.

Básicamente, las sociedades menos equitativas tienen peor calidad de vida. Tanto en los diversos países como en los estados federados de EE.UU., cuanta más acusada es la desigualdad, más elevados son los índices de delincuencia (homicidios incluidos) y de población reclusa, sea cual sea el nivel absoluto de renta. A lo que se añaden unos índices más altos de acoso escolar, embarazos adolescentes y analfabetismo, aparte de problemas psiquiátricos, alcoholismo y drogadicción, menos felicidad y menos promoción social. Además, el apoyo social disminuye. Una jerarquía desmesurada es la antítesis de la equidad y simetría que cimientan la amistad. Este sombrío panorama ayuda a explicar el hecho tremendamente importante de que la desigualdad en auge repercute en la salud de la comunidad entera.

Y es que el problema acaba afectando a todos: a ricos y a pobres. Cuando la desigualdad se acentúa, las clases pudientes suelen invertir más recursos para aislarse de lo que sucede bajo los puentes. He escuchado al economista Robert Evans, de la Universidad de la Columbia Británica, llamar a este fenómeno la «secesión de los ricos». Destinan más recursos a urbanizaciones cerradas, escuelas privadas, agua embotellada y caros alimentos ecológicos. Y donan grandes sumas de dinero a los políticos para que les ayuden a mantener su estatus. Pero alzar fuertes muros para mantener fuera todo lo que causa desasosiego resulta estresante.

Saber que esos factores psicológicos y sociales influyen en la biología de la enfermedad es una cosa, pero demostrar de qué modo esos factores estresantes repercuten en el cuerpo es otra. Los investigadores hemos hecho notables avances al respecto. Hemos aprendido mucho sobre el modo en que la pobreza afecta a la biología y hemos logrado trazar los vínculos fisiológicos que enlazan la desigualdad externa con tres mecanismos clave de nuestro interior: la inflamación crónica, el envejecimiento cromosómico y el funcionamiento del cerebro.

UNA CARGA PESADA

El conocimiento de la biología de la enfermedad experimentó una revolución en la década de 1990, cuando Bruce McEwen, de la Universidad Rockefeller, dio a conocer el concepto de carga alostática. Nuestro organismo es hostigado sin cesar por el entorno que nos rodea, y permanecemos sanos siempre que seamos capaces de responder a esa hostilidad y recuperemos el estado de partida, u homeostasis. Tradicionalmente, esa perspectiva impulsó a los estudiosos a centrar su atención en órganos concretos afectados por problemas concretos. La visión de la alostasia es distinta: los cambios fisiológicos adversos provocan adaptaciones de gran alcance en todo el cuerpo. Un dedo infectado, por ejemplo, no solo hará que se inflame el extremo del pie, sino que provocará cambios más extensos en el resto del cuerpo, desde las calorías movilizadas en la grasa abdominal hasta la bioquímica cerebral del sueño. Conforme ese desgaste biológico prosigue, diversas partes del cuerpo dejan de funcionar a su nivel óptimo, situación que puede llegar a ser tan dañina para la salud como el fallo de un solo órgano.

Teresa Seeman, de la Universidad de California en Los Ángeles, tomó esa idea y la siguió por todo el cuerpo, midiendo varios biomarcadores del desgaste natural, como el aumento de la presión arterial, del colesterol y otros lípidos de la sangre, del índice de masa corporal, de indicadores moleculares de la hiperglucemia crónica, y, por último, de los niveles de las hormonas del estrés. Constató que ese grupo de parámetros tan dispares predice de forma clara la salud física y la mortalidad.

Investigaciones recientes de Seeman y otros vinculan el NSE bajo con una carga alostática opresiva, pues el organismo libra una lucha incesante y fútil por restablecer la normalidad, la vida sin estrés. Esos hallazgos subrayan una cuestión importante: mientras que el NSE en los adultos predice un desgaste alostático, en los niños deja una huella profunda para el resto de la vida. Un NSE bajo predispone el cuerpo de los jóvenes a sufrir un envejecimiento prematuro. Aun así, también se han hallado factores protectores. Crecer en un barrio pobre agrava el vínculo entre el NSE bajo y la carga alostática, aunque tener una madre que disponga del tiempo y del vigor necesarios para ser solícita mitigará los daños.

El estrés en cualquiera de sus formas provoca tales efectos. No tiene por qué adoptar la forma de precariedad económica, sino que suele ir vinculado con las situaciones sociales. Mi propio trabajo con papiones que vagan en libertad por la sabana del este de África ha mostrado esa relación. En las manadas de estos primates, cada cual sufre más o menos estrés según el lugar que ocupa en la jerarquía social. Los papiones de bajo rango (una situación socialmente estresante) sufren alteraciones perjudiciales para la salud en forma de secreción de glucocorticoides (hormonas del estrés, como el cortisol). El aparato reproductor y el circulatorio experimentan cambios nocivos, al igual que el sistema inmunitario.

Tanto en la jerarquía animal como en la humana, las modificaciones generadas por el estrés afectan a la salud a través de un mecanismo clave: la inflamación crónica. Pocos procesos biológicos ofrecen un mejor ejemplo de doble filo que la inflamación. Cuando un tejido sufre una lesión, la inflamación contiene el daño e inicia la reparación celular. Pero si se generaliza y se cronifica, la inflamación provoca alteraciones moleculares por todo el cuerpo, hasta el punto de que los estudios han demostrado que contribuye a enfermedades tan diversas como la ateroesclerosis o el alzhéimer. Trabajos recientes (entre ellos el mío propio, centrado en la inflamación del sistema nervioso) indican que el estrés acusado y prolongado promueve la inflamación crónica. En las personas, la pobreza infantil regula al alza el umbral proinflamatorio en el cuerpo

del adulto, con el aumento de la expresión de los genes inflamatorios y la elevación de los niveles de marcadores de la inflamación, como la proteína C reactiva, vinculada a un mayor riesgo de ataques cardíacos.

Se trata de efectos a largo plazo: las graves pérdidas económicas de la Gran Depresión se relacionaron con niveles más altos de proteína C reactiva seis años después. El ser humano comparte esas vulnerabilidades con otros primates que viven en circunstancias desiguales. Jenny Tung, de la Universidad Duke, ha descubierto más marcadores de la inflamación crónica en los macacos (*Macaca mulatta*) de la India de bajo rango que en los individuos dominantes del mismo grupo. Estudios como el suyo ponen de manifiesto el fuerte vínculo entre los factores de estrés social y la biología de la enfermedad, pues se da en una especie que no se ve afectada por factores de riesgo asociados al estilo de vida, como los altos índices de tabaquismo y consumo de alcohol que tan a menudo se observan en las personas inmersas en situaciones desfavorecidas.

ENVEJECIMIENTO PREMATURO DEL ADN

El mejor conocimiento del modo en que el NSE influye en la salud también se lo debemos a una medición sumamente sensible del envejecimiento: el estado de los telómeros, los segmentos de ADN situados en los extremos de los cromosomas. Los telómeros (los biólogos moleculares los equiparan a un herrete, el cabo de hierro o plástico que remata el cordón del zapato e impide que se deshilache) ayudan a mantener estables los cromosomas. Cada vez que estos se duplican en el proceso de división celular, sus telómeros se acortan; si se reducen demasiado, la célula deja de dividirse y pierde muchas de sus funciones normales. El acortamiento de los telómeros es contrarrestado por la enzima telomerasa, que repone los extremos. Por eso el estado de los telómeros nos dice mucho sobre la edad biológica de la célula, y los que se han reducido y dan lugar a cromosomas desgastados y frágiles parecen ser un indicio molecular de deterioro.

La biología de los telómeros se relacionó con la psicología del estrés en un estudio de 2004 llevado a cabo por la psicóloga especializada en salud Elissa Epel, de la UCSF, y Elizabeth Blackburn, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, galardonada con el Nobel por su trabajo pionero con los telómeros. Ambas examinaron a 39 personas que soportaban cada día un estrés intenso: mujeres a cargo de niños con enfermedades crónicas. El hallazgo histórico fue que los glóbulos blancos de esas cuidadoras presentaban telómeros cortos, una menor actividad de la telomerasa y un mayor daño oxidativo en las proteínas y las enzimas. (La oxidación puede inutilizar la telomerasa.) Cuanto más prolongada era la dolencia del menor, más estrés referían las mujeres y más cortos eran sus telómeros, aun después de que los investigadores tuvieran en cuenta posibles factores de confusión, como la alimentación y el tabaquismo. Normalmente, los telómeros se van acortando a un ritmo más o menos constante en todas las personas, pero los cálculos revelaron que los de estas mujeres acumulaban alrededor de una década más (en ocasiones más) que los de las integrantes de un grupo poco estresado.

LA DESIGUALDAD DESDE DENTRO

Vivir en una sociedad con grandes desigualdades entre los ricos y los pobres genera estrés psicológico y social. Este mina la salud de múltiples modos que afectan al cerebro, al sistema inmunitario y al ADN, según confirma una multitud de estudios. Aquí se exponen algunos de los efectos que acarrean enfermedades y trastornos mentales graves.

Corteza prefrontal
Esencial para la planificación y la toma de decisiones sensatas, esta región resulta alterada por las hormonas del estrés.

Hipocampo
Este centro nervioso clave para el aprendizaje y la memoria reduce su actividad y encoge de tamaño.

Amígdala
El miedo y la angustia son canalizados a través de este centro, cuya actividad se intensifica.

Sistema dopaminérgico mesolímbico
Las señales neuronales generadas en su seno son esenciales para la motivación, pero quedan alteradas, lo que aumenta el riesgo de depresión y adicción.

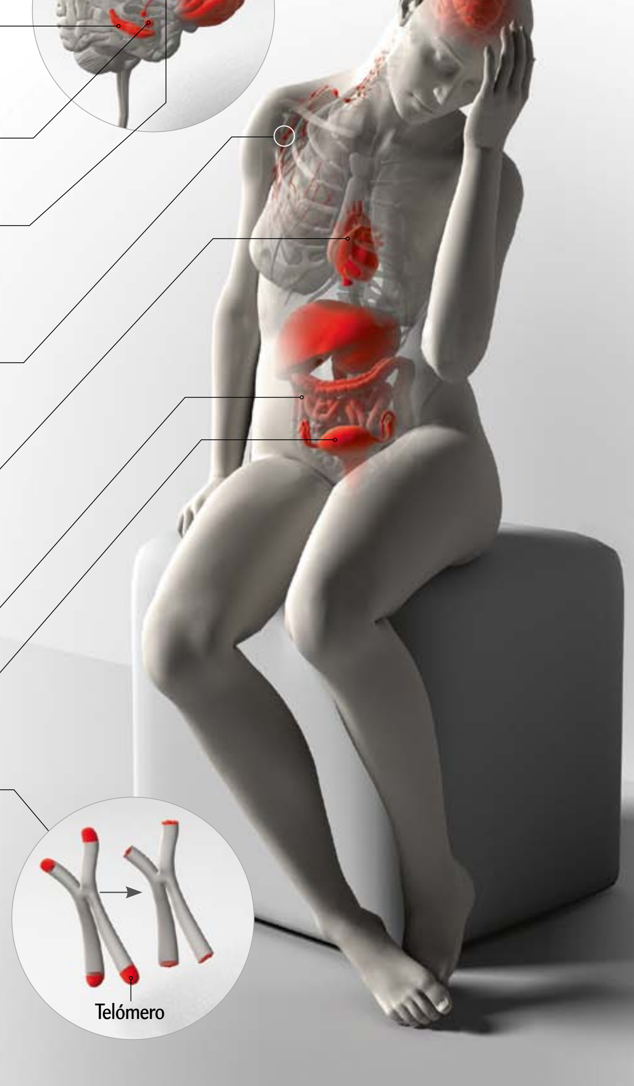
Inflamación crónica
Este estado, desatado por las hormonas del estrés y del sistema inmunitario, daña moléculas de todo el cuerpo y exacerba el riesgo de cardiopatía o de alzhéimer, entre muchas otras dolencias.

Aparato circulatorio
La elevación de la presión arterial agrava el riesgo de ateroesclerosis y de ictus.

Metabolismo
Las células del organismo responden menos a la insulina, y la grasa abdominal aumenta, lo que acaba provocando diabetes.

Órganos reproductores
Las anomalías alteran la fecundidad y la libido.

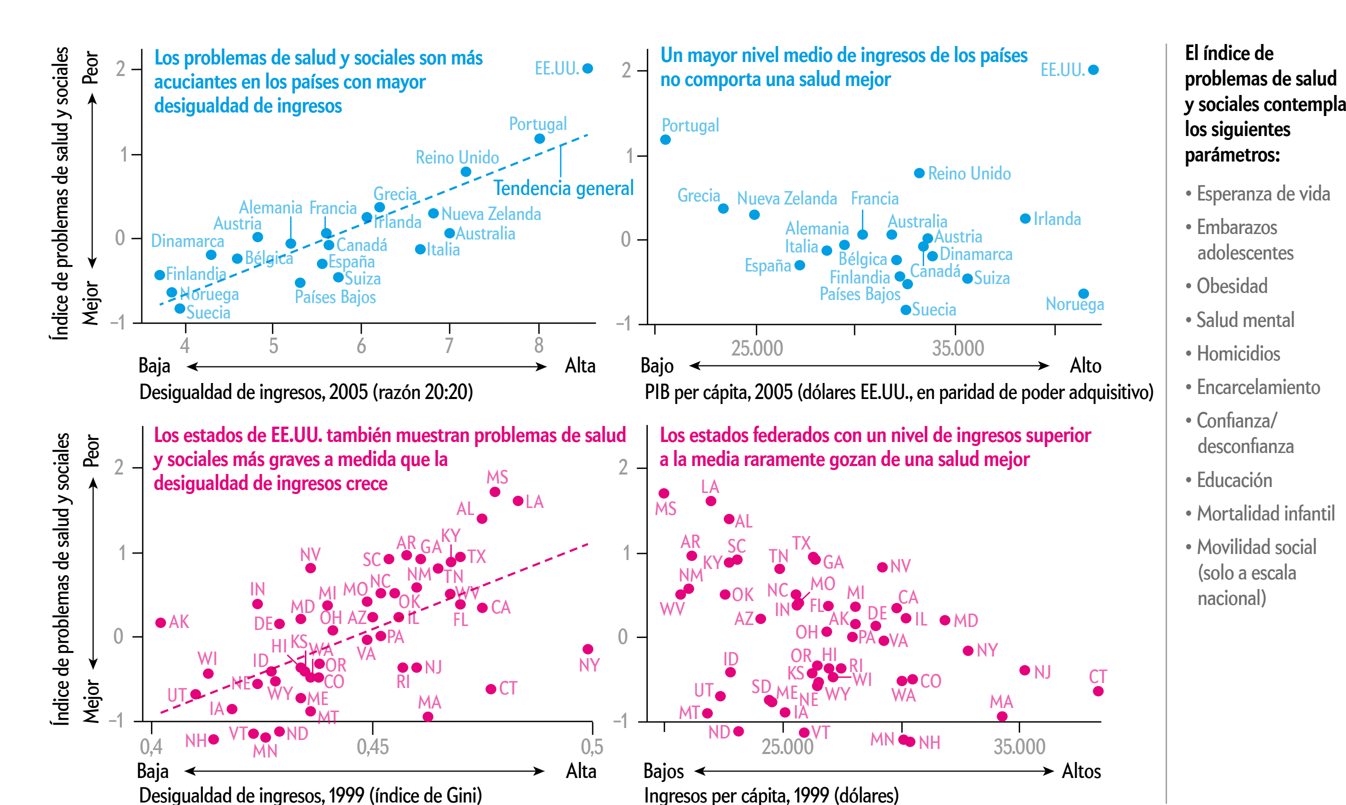
Cromosomas
El ADN de nuestros cromosomas permanece estable gracias a pequeños cabos situados en sus extremos, los telómeros (*rojo*). Cuando sufrimos estrés por circunstancias sociales, los telómeros se acortan y los cromosomas se vuelven frágiles y vulnerables, un tipo de envejecimiento molecular prematuro.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

LA SALUD DE LAS NACIONES

Alrededor del mundo, los problemas sociales y de salud van en auge en paralelo con las diferencias económicas. Los epidemiólogos Richard Wilkinson y Kate Pickett demostraron esta relación en su libro de 2009 *The spirit level*. Clasificaron los países con un baremo económico de la ONU denominado razón 20:20, que compara el 20 por ciento de las personas más ricas con el 20 por ciento más pobres. A medida que la brecha se ensancha, el índice combinado de esperanza de vida, mortalidad infantil, problemas de salud mental, obesidad y otros trastornos empeora. Los ingresos medios en tales países no explican esa tendencia. En los estados federados de EE.UU. han hallado un efecto parecido. Clasificaron los estados según el baremo de la Oficina del Censo de EE.UU., el índice de Gini, que compara los ingresos entre todos los miembros de la población, no solo de determinados grupos. De nuevo en este caso, la tendencia de los efectos perjudiciales para la salud se asoció con la desigualdad y no se pudo explicar por la renta media de cada estado.



THE SPIRIT LEVEL: WHY GREATER EQUALITY MAKES SOCIETIES STRONGER. KATE PICKETT Y RICHARD WILKINSON. BLOOMSBURY, 2009; OFICINA DE ANÁLISIS ECONÓMICO, DEPARTAMENTO DE COMERCIO DE EE.UU. (*ingresos per cápita en EE.UU.*); INFORME SOBRE DESARROLLO HUMANO 2007/2008. COMBATIR EL CAMBIO CLIMÁTICO: SOLIDARIDAD FRENTE A UN MUNDO DIVIDIDO. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO, 2007 (*PIB per cápita*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*)

Este descubrimiento desató una avalancha de estudios que respaldaron sus conclusiones, las cuales revelaron que factores estresantes como la depresión mayor, el trastorno por estrés postraumático y la discriminación racial aceleran el acortamiento de los telómeros. No sorprende, pues, que la pertenencia a un NSE bajo durante la infancia también se relacione con telómeros más cortos en la edad adulta; vivir en un barrio pobre y sin recursos, presenciar o sufrir violencia, la inestabilidad familiar (como el divorcio, la muerte o el encarcelamiento de un progenitor) y otros rasgos propios de la pobreza en los primeros años se vinculan con una reducción de esos extremos cromosómicos en momentos posteriores de la vida. Si un niño soporta una infancia con estrecheces, cuando alcance la mediana edad sus telómeros probablemente estarán una década más envejecidos que los de otras personas que gozaron de una infancia más afortunada.

En suma, desde la escala macroscópica que representan los aparatos y sistemas corporales hasta la escala microscópica que encarnan los cromosomas, la pobreza encuentra el modo de hacer mella. La mayoría de los estudios versados en la longitud de los telómeros comparan los «pobres» con los «no pobres», a semejanza de los que examinan la carga alostática, pero los pocos que examinan el espectro entero de la desigualdad muestran que cada descenso en la escala del NSE tiende a empeorar esos marcadores biológicos del envejecimiento.

FUERA DE CONTROL

Descender por la escala modifica asimismo el cerebro y el comportamiento, según un nutrido número de estudios neurobiológicos recientes. En mi laboratorio nos hemos dedicado durante un cuarto de siglo a estudiar el efecto del estrés en el cerebro de los roedores, los monos y el ser humano. Junto con otros laboratorios, hemos averiguado que uno de los puntos candentes radica en el hipocampo, una región crítica para el aprendizaje y la memoria. El estrés o la exposición prolongada a concentraciones excesivas de glucocorticoides afectan a la memoria al reducir la excitabilidad del hipocampo, pues retrae las conexiones entre las neuronas y paraliza la formación de neuronas nuevas. En la amígdala, otra región primordial en el miedo y la angustia, el estrés y los glucocorticoides potencian ambas reacciones. En lugar de atenuar las cosas como hacen en el hipocampo, en esta región promotora del miedo aumentan la excitabilidad y expanden las conexiones neuronales. En conjunto, todos esos hallazgos contribuyen a explicar por qué el trastorno por estrés postraumático atrofia el hipocampo y agranda la amígdala. Otra zona afectada es el sistema dopaminérgico mesolímbico, una red

esencial en la recompensa, la anticipación y la motivación. El estrés crónico lo altera, lo que deriva en una propensión hacia la anhedonia de la depresión y a caer en las adicciones.

El bombardeo de los glucocorticoides afecta también a la corteza prefrontal, clave para la planificación a largo plazo, la función ejecutiva y el control de los impulsos. En esa región, el estrés social y los glucocorticoides elevados debilitan las conexiones neuronales, lo cual dificulta la comunicación entre ellas. La mielinización, el proceso que recubre con una capa aislante las prolongaciones (axones) que enlazan las neuronas y que acelera la transmisión de las señales, queda alterado. El volumen de células desciende en la zona y la inflamación crónica se activa.

¿Qué ocurre cuando la corteza prefrontal queda afectada de ese modo? Se toman decisiones impulsivas, pésimas. Pensemos en el llamado «descarte por demora»: cuando se puede elegir entre una recompensa inmediata u otra mayor si se sabe esperar, el interés se desvanece a medida que el tiempo de espera aumenta. La corteza prefrontal normalmente es capaz de contrarrestar esa visión cortoplacista. Pero el estrés agudiza la impulsividad: cuanto más se acentúa, menos se activa esa región cortical en los experimentos que demandan aplazar la gratificación. En las personas atrapadas por la desigualdad, la actividad decreciente de la corteza prefrontal dificulta que el cerebro dé prioridad a la salud a largo plazo sobre el placer inmediato. Ese efecto neurológico puede explicar por qué las personas con una vida más estresante engordan, fuman y beben más que las sometidas a menos estrés.

Esos cambios en la corteza prefrontal también se dan en los niños. En estudios independientes, Martha Farah, de la Universidad de Pensilvania, y W. Thomas Boyce, ahora en la UCSF, observaron que los niños de preescolar con un NSE bajo solían presentar niveles altos de glucocorticoides, una corteza prefrontal más delgada y menos activa, y una función ejecutiva y un control de los impulsos más deficiente, aspectos que, recordemos, dependen de esa región cortical. Tales efectos aumentan a medida que los niños crecen. En la adolescencia, el NSE bajo anticipa un volumen más pequeño de la citada corteza, y en la edad adulta predice decisiones más impulsivas, las que buscan una recompensa inmediata.

Algunas de esas observaciones suscitan preguntas como qué fue antes, si el huevo o la gallina. Los cambios cerebrales podrían dar lugar a malas elecciones, y ello a su vez agravaría la pobreza, no al revés. Pero las investigaciones apuntan a que las causas y los efectos van en la otra dirección: el NSE y la desigualdad influyen primero en la función de la corteza prefrontal, y después en otros daños que sobrevienen. Por ejemplo, el NSE de los niños de preescolar se ha relacionado con el funcionamiento de su corteza prefrontal; pocos críos de cinco años caen en la pobreza derrochando su sueldo en bebida y en apuestas deportivas. Otro estudio de 2013 a cargo de Jiaying Zhao, de la Universidad de la Columbia Británica, y sus colaboradores aporta más pruebas. Examinaron a agricultores indios cuya solvencia económica varía con las estaciones. Al pasar de la estrechez (durante la época de siembra) a la abundancia (después de la cosecha) experimentan mejoras en el funcionamiento de la corteza prefrontal.

A mi juicio, la prueba más importante procede de los experimentos en que se logra rebajar la sensación que las personas tienen sobre su NSE. En ellos se demuestra que tales personas demuestran más tarde una mayor impulsividad. En un estudio de 2012, los participantes se enfrentaron entre sí en un juego de azar, con distintas cantidades iniciales a su favor. Los jugadores «pobres» fueron más propensos a pedir prestado a cuenta de las futuras ganancias y tuvieron menos en cuenta pistas útiles sobre la estrategia del juego.

LA CIENCIA DE LA DESIGUALDAD

En otro estudio, los probandos a los que se pidió que imaginaran situaciones de pérdida económica (frente a situaciones neutras o beneficiosas) mostraron un mayor descarte por demora en una tarea no relacionada. En otra investigación, se incitó a los participantes a imaginar un contratiempo en su economía al tener que afrontar una reparación costosa del automóvil; la función cognitiva permaneció inalterada en los individuos con un NSE alto, pero se redujo en los más pobres.

¿Por qué la sensación pasajera de pertenecer a un NSE bajo provoca cambios cognitivos característicos de ese NSE en la vida real? Una explicación es que se trata de una reacción racional, pues resulta difícil pensar en guardar ahorros para la vejez si a duras penas nos alcanza para llenar la despensa. La pobreza resta importancia al futuro.

Pero existe otra explicación de peso vinculada con el estrés: la planificación a largo plazo y el control de los impulsos desgastan la corteza prefrontal. Si se aumenta la «carga» cognitiva con tareas arduas que dependan de esa región cortical, las personas se vuelven más propensas a saltarse la dieta. O, como los científicos han comprobado, si se aumenta la carga cognitiva tentando con tentempiés a personas a dieta, estas rinden peor en las pruebas dependientes de la corteza en cuestión. No está claro en qué medida ello es consecuencia del «agotamiento» metabólico de la corteza prefrontal o de la desmotivación.

Sea como sea, pertenecer a un NSE bajo crea una preocupación crónica por la economía que distrae y agota. Cuando se anda angustiado por el pago del alquiler resulta difícil bordar una tarea psicológica consistente en, digamos, restar una serie de cifras, o cumplir un propósito más importante, como poner freno a la bebida. Un hallazgo en el estudio de reparación del automóvil respalda esa interpretación. Cuando los participantes afrontaron una reparación barata, todos culminaron igual de bien las tareas cognitivas, tuvieran un NSE alto o bajo.

Sin duda, hemos de conocer mejor las consecuencias biológicas de la desigualdad y aprender a curar mejor sus secuelas físicas. Pero, con franqueza, ahora mismo sabemos lo suficiente como para que la situación nos provoque indignación. Es indignante que si un niño nace en una familia desfavorecida sea propenso a tener mala salud en el momento en que comience a aprender el abecedario. No tenemos que cuantificar la inflamación ni medir la longitud de los cromosomas para saber que no es justo, aunque si se hace, tanto mejor para la ciencia.

PARA SABER MÁS

Why zebras don't get ulcers: The acclaimed guide to stress, stress-related diseases, and coping. Tercera edición. Robert M. Sapolsky. Holt Paperbacks, 2004.
The spirit level: Why greater equality makes societies stronger. Richard Wilkinson y Kate Pickett. Bloomsbury Press, 2010.
Behave: The biology of humans at our best and worst. Robert M. Sapolsky. Penguin Press, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Pobreza y enfermedad. Robert M. Sapolsky en *IyC*, febrero de 2006.
Los costes sociales del estrés. Elizabeth H. Blackburn y Elissa S. Epel en *IyC*, agosto de 2013.
Pobreza y cerebro infantil. Kimberly G. Noble en *IyC*, mayo de 2017.



ANDREA UCINI



LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PREJUICIOS

Los algoritmos diseñados para paliar la pobreza podrían perpetuarla

Virginia Eubanks

A finales de 2006, el gobernador de Indiana, Mitch Daniels, anunció un plan que ofrecería «a las personas más necesitadas del estado más oportunidades para escapar de las prestaciones sociales y acceder al mundo del trabajo y la dignidad». Firmó un contrato de 1160 millones de dólares con un consorcio de empresas entre las que figuraba IBM para privatizar y automatizar los procesos de concesión de ayudas sociales de Indiana.

En vez de cumplimentar las solicitudes en la oficina del condado, se animó a los interesados a presentarlas a través de un nuevo sistema en línea. Se trasladó a cerca de 1500 funcionarios estatales a puestos privados en centros regionales de atención telefónica. Los trabajadores sociales que atendían a familias en las oficinas municipales pasaron a encargarse de las tareas que iban apareciendo en un sistema de gestión de flujos de trabajo y a atender casos que podían proceder de cualquier parte del estado: las llamadas se transferían al primer operador disponible. El Gobierno insistía en que esa transición hacia las comunicaciones electrónicas mejoraría el acceso de las personas necesitadas, mayores y discapacitadas a los servicios y ahorraría dinero a los contribuyentes.

Estados Unidos lleva mucho tiempo reuniendo y analizando información sobre familias pobres y de clase obrera, desde los libros de contabilidad de los asilos a las diapositivas de la Oficina de Registros Eugenésicos. Como Daniels, los actuales políticos y gestores de programas recurren con frecuencia a la automatización para remodelar la asistencia social, una tendencia que a veces se denomina «analítica de la pobreza»: la regulación digital de los pobres mediante la recogida, el intercambio y el análisis de datos. Adopta múltiples formas, desde la predicción del maltrato

EN SÍNTESIS

Algunos programas de lucha contra la pobreza ya han comenzado a usar algoritmos automatizados para determinar quiénes deberían recibir ayudas públicas.

Pero la pobreza no es solo cuestión de datos. Si no se atacan los problemas de base, tales métodos pueden incurrir en sesgos sistemáticos que aumenten aún más la desigualdad.



Virginia Eubanks es profesora de ciencias políticas en la Universidad Estatal de Nueva York en Albany. Su libro más reciente es *Automating inequality: How high-tech tools profile, police, and punish the poor* (St. Martin´s Press, 2018).

infantil usando modelos estadísticos hasta el seguimiento de los movimientos de refugiados con imágenes de satélite de alta definición. El resurgimiento contemporáneo de la analítica de la pobreza está alcanzando su apogeo, con incesantes evaluaciones del poder de los macrodatos y la inteligencia artificial para mejorar el bienestar social, la actuación policial, las condenas penales o los servicios a personas sin techo.

La idea central detrás de estos proyectos es que la pobreza es, en esencia, un problema de ingeniería de sistemas. La información sencillamente no llega a donde necesita ir, lo cual se traduce en un uso ineficiente, o incluso contraproducente, de los recursos. El auge de los sistemas automatizados de selección, los algoritmos de toma de decisiones y el análisis predictivo es, con frecuencia, aclamado como una revolución en la administración pública. Pero puede que no sea más que un retorno digitalizado al racionamiento económico, respaldado por las pseudociencias, del pasado.

LA CIENCIA DE LOS POBRES

En 1884, Josephine Shaw Lowell publicó un libro titulado *Public relief and private charity (*«Socorro público y caridad privada»), donde instaba a los Gobiernos a que cesaran de brindar ayudas a las familias que aún luchaban contra los efectos de la depresión económica acaecida entre 1873 y 1879. Lowell, fundadora de la Sociedad de Organización de la Caridad de Nueva York, escribió que, sin una investigación moral previa, las ayudas —incluso las modestas— creaban pobreza en lugar de paliarla, pues alentaban la holgazanería y los vicios. Prometía que «la caridad privada puede ocuparse y se ocupará de todos los casos que deban excluirse de las fuentes públicas de ayuda». Pero ¿cómo podrían asumir los acaudalados filántropos del país la responsabilidad del Gobierno de proteger a sus ciudadanos de las crisis económicas? Su solución era sencilla: aplicar técnicas científicas a la caridad.

Lowell y otros defensores de la «caridad científica» creían que un método basado en datos y pruebas podría distinguir a los pobres que realmente merecían ayudas, haciendo que la asistencia social fuera más sostenible y eficaz. Tal corriente de pensamiento introdujo los métodos de trabajo social individualizado, donde agentes de policía verificaban todas las facetas de la vida de los solicitantes de prestaciones entrevistando a vecinos, tenderos, médicos y sacerdotes. Ello generó una cultura de predicciones y elaboración de perfiles, investigación y clasificación moral, desatando una riada de datos sobre familias pobres y de clase trabajadora que aún fluye hoy en día.

Los defensores contemporáneos de la analítica de la pobreza sostienen que los servicios públicos mejorarán si usamos dichos datos para crear un sistema de «información procesable» sobre el fraude y el despilfarro. Daniels, por ejemplo, prometió que el estado de Indiana ahorraría 500 millones de dólares en costes administrativos y otros 500 identificando fraudes y solicitudes no válidas durante los 10 años del contrato.

En realidad, el sistema privado de atención telefónica rompió la relación entre los trabajadores sociales y las personas a las que atendían, dificultando que las familias recibieran las ayudas a las que tenían derecho. Al priorizar las solicitudes en línea se perjudicó a las familias con ingresos bajos, la mitad de las cuales carecían de acceso a Internet. El estado no digitalizó décadas de papeleo, obligando a los destinatarios de las ayudas a presentar de nuevo toda su documentación. Además, el rígido sistema automatizado no diferenciaba entre un error sincero, uno burocrático y un intento de fraude; así, cada fallo, ya fuera una firma olvidada o un problema informático, se interpretaba como un posible delito.

El experimento de Indiana con el sistema automatizado de evaluación de solicitudes se saldó con un millón de prestaciones denegadas en tres años, un incremento del 54 por ciento respecto al período anterior. Ante la presión de los ciudadanos furiosos, los legisladores (tanto demócratas como republicanos) y los saturados gobiernos locales, Daniels anuló el contrato con IBM en 2009, lo cual derivó en una costosa batalla legal financiada por los contribuyentes que se prolongó durante ocho años.

VIGILANCIA SESGADA

La analítica de la pobreza no responde solo al deseo de disminuir costes y aumentar la eficiencia. Sus defensores también aspiran al loable objetivo de eliminar los prejuicios. Al fin y al cabo, la discriminación racial en los programas de servicios sociales tiene profundas raíces históricas.

En el sistema de protección de menores, tradicionalmente el problema no ha radicado en la exclusión de las personas de color, sino en lo contrario: su excesiva *inclusión* en programas que aumentan el escrutinio estatal a las familias. Según el Consejo Nacional de Jueces del Tribunal de Menores y de Familia de EE.UU., la tasa de niños afroamericanos apartados de sus hogares excede su proporción en la población general en 47 estados. No hay duda de que eso era así en el condado de Allegheny, Pensilvania: en 2016, el 38 por ciento de los niños en hogares de acogida eran afroamericanos, aunque estos representaban menos del 19 por ciento de los jóvenes del condado.

En agosto de 2016, el Departamento de Servicios Sociales de este condado lanzó la Allegheny Family Screening Tool (AFST), una herramienta de modelización estadística para intentar predecir qué niños tienen más probabilidades de sufrir malos tratos o abandono. La aplicación, diseñada por un equipo internacional liderado por la economista Rhema Vaithianathan, de la Universidad Tecnológica de Auckland, y en el que también participaba Emily Putnam-Hornstein, directora de la Red de Datos Infantiles de la Universidad del Sur de California, emplea la información recopilada en un almacén de datos del condado que recibe regularmente extractos de decenas de programas públicos, incluidas cárceles, servicios de libertad condicional, instituciones mentales y oficinas de prestaciones económicas y educativas. El Departamento de Servicios Sociales espera que la AFST, al analizar dos décadas de datos, ayude a los subjetivos evaluadores humanos a decidir qué familias deben ser investigadas para garantizar la protección de los menores.

Los reformadores de la caridad científica del siglo XIX también argumentaban que una toma de decisiones más objetiva podría transformar los programas públicos, que consideraban corrompidos por el clientelismo político y el provincianismo étnico. Sin embargo, veían los prejuicios a través de una lente estrecha: la discriminación era puntual y deliberada, producto del interés personal. Lo que no advirtieron es que incorporaron un sesgo sistémico y estructural en sus prácticas y herramientas científicas, supuestamente objetivas.

Si una característica inherente a la caridad científica era la austeridad, otra era la supremacía blanca. Mientras se vendía como fiel a las evidencias y neutral en sus juicios de valor, la caridad científica negaba la ayuda a los afroamericanos recién emancipados y apoyaba las restricciones a la inmigración. Además, hizo enormes esfuerzos por proteger a las élites blancas de las amenazas que creía que acechaban en la propia raza: baja inteligencia, criminalidad y sexualidad desenfrenada. En

el fondo se trataba de un ejercicio eugenésico: intentar frenar el aumento de la pobreza impidiendo el crecimiento de las familias pobres.

No cabe duda de que herramientas como la AFST han nacido de un deseo de mitigar este tipo de intolerancia. Sin embargo, nuestros prejuicios también forman parte ineludible de los modelos predictivos de riesgo. Por ejemplo, la AFST se basa en los datos de las personas que acuden a los servicios públicos de asistencia social. Puede que las familias más ricas contraten a niñeras para cuidar de sus hijos o recurran a un médico para tratar una adicción, pero como los pagan de su bolsillo o con un seguro privado, sus datos no se almacenan, por lo que la AFST puede pasar por alto los malos tratos o el abandono infantil en hogares de clase media. La sobrevigilancia de los pobres condiciona de manera sistémica las predicciones del modelo al interpretar el uso de las ayudas públicas como un riesgo para los menores. Básicamente, el modelo confunde ser un padre pobre con ser un mal padre.

Dado que, por suerte, en el condado de Allegheny no se producen suficientes casos mortales o casi mortales de maltrato infantil como para desarrollar un modelo fiable, el equipo de Vaithianathan usó una variable relacionada como aproximación del abuso: la «colocación del menor», es decir, el traslado de un niño a un hogar de acogida en un plazo de dos años desde la evaluación inicial. Así, lo que el modelo predice es la decisión de la agencia de apartar a un menor de su hogar, no la ocurrencia real de maltrato. Aunque esta elección no es malintencionada, sino fruto de la necesidad, el bienestar del menor es subjetivo y, por tanto, poco adecuado para un modelo predictivo.

Además, aunque la AFST podría revelar sesgos en las evaluaciones iniciales, la mayor parte de la desproporción racial no se produce en esa fase, sino —como muestra la propia investigación del condado— en las acusaciones, ya que se presentan hasta tres y cuatro veces más denuncias por malos tratos y abandono infantil contra familias afroamericanas e interraciales que contra familias blancas. Una vez remitidos los casos, el criterio de los evaluadores no supone grandes diferencias: un estudio de 2010 mostró que se admiten el 69 por ciento de los casos referidos a niños afroamericanos y mestizos, y el 65 por ciento de los que involucran a niños blancos. Irónicamente, eliminar el juicio de los evaluadores podría incrementar la injusticia racial al impedir que corrijan los prejuicios de la comunidad.

Nuestra predisposición a creer que la tecnología toma decisiones más objetivas que nosotros mismos empeora las cosas. Y es que los economistas y científicos de datos pueden albergar creencias culturales tan equivocadas sobre las familias pobres blancas y de color como cualquier evaluador de llamadas. Cuando los diseñadores de sistemas programan sus suposiciones en estas herramientas, ocultan importantes decisiones políticas tras una fachada matemática de neutralidad tecnológica.

MODELIZAR LA JUSTICIA

Los gestores y científicos de datos que trabajan en servicios públicos a menudo comparten una idea preconcebida: la analítica de la pobreza es un sistema de triaje para resolver el problema de cómo abordar enormes necesidades con recursos limitados. Sin embargo, aceptar que algunas personas puedan satisfacer sus necesidades básicas y otras no es una decisión política. La pobreza no es un desastre natural; la crean la explotación estructural y las malas políticas.

La ciencia de datos puede desempeñar un papel importante en el tratamiento de desigualdades profundas. Los críticos progresistas de los algoritmos de toma de decisiones proponen centrarse en la transparencia, la responsabilidad y un diseño orientado a las personas para acercar los macrodatos a la justicia social. Desde luego, en una democracia, cualquier sistema digital para la toma de decisiones debe basarse en dichos valores. Pero la analítica de la pobreza se ha limitado, en el mejor de los casos, a mejorar a duras penas la precisión y equidad de sistemas con beneficios sociales ya cuestionables. Necesitamos replantearnos los principios básicos y reconocer que, en un contexto de austeridad, racismo estructural y criminalización de la pobreza, los análisis sin restricciones potenciarán la discriminación y el sufrimiento económico.



Deberíamos comenzar por comprobar que los modelos no producen los mismos efectos que se supone que deben predecir. Por ejemplo, si los padres evitan los servicios públicos por miedo a que la AFST los clasifique como de alto riesgo, eso podría provocar el tipo de tensión que termina en malos tratos y abandono. También es necesario implementar herramientas capaces de detener aquellos sistemas que tengan un impacto negativo o no deseado. Debe garantizarse la seguridad de los datos, pero más importante aún es que se obtengan sin coacciones, de modo que las familias no sientan que renuncian a un derecho humano básico —la privacidad, seguridad o integridad familiar— a cambio de otro como la comida o la vivienda.

Por último, hay que instaurar mecanismos de reparación para los perjudicados por la analítica de la pobreza. Como señala un artículo de 2018 del Foro Económico Mundial sobre discriminación en el aprendizaje automático, quienes diseñan e implementan sistemas automatizados de toma de decisiones tienen la obligación de establecer protocolos «para la oportuna compensación de cualquier resultado discriminatorio» y de facilitar su uso.

La analítica de la pobreza no cambiará de manera sustancial hasta que reescribamos las historias falsas que contamos. Pese a la creencia popular, en los Estados Unidos la pobreza no es una anomalía. Según una investigación de los sociólogos Mark R. Rank y Thomas Hirschl, el 51 por ciento de los estadounidenses se encontrará por debajo del umbral de la pobreza en algún momento entre los 20 y los 64 años, y casi dos tercios recurrirán a programas de ayuda social basados en los ingresos, como la Asistencia Temporal a Familias Necesitadas y Medicaid. Así que en vez de diseñar sofisticados termómetros morales, deberíamos construir suelos universales bajo nuestros pies. Eso implica financiar completamente los programas públicos, garantizar buenos salarios y condiciones de trabajo seguras, apoyar los cuidados a personas dependientes, fomentar la sanidad y proteger la dignidad y autodeterminación personal. Hasta entonces, no estaremos modernizando el triaje, sino automatizando la injusticia.

PARA SABER MÁS

Automating inequality: How high-tech tools profile, police, and punish the poor. Virginia Eubanks. St. Martin's Press, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Evaluación científica de los programas contra la pobreza. Dean Karlan en *IyC*, diciembre de 2015.



ANDREA UCINI



EL COSTE AMBIENTAL DE LA DESIGUALDAD

El reparto desequilibrado del poder favorece la degradación ambiental, cuyas consecuencias pagan los pobres *James K. Boyce*

En otoño de 2016, un conflicto ambiental en las zonas rurales de Dakota del Norte saltó a la prensa mundial. La tribu siux de Standing Rock y los activistas climáticos se enfrentaban a los promotores corporativos y gubernamentales del oleoducto Dakota Access, que se construía con el objetivo de transportar el petróleo extraído de los yacimientos de esquistos bituminosos de Bakken, en el mismo estado, hasta una terminal emplazada en Illinois. Un equipo de guardias de seguridad privados soltaron perros contra los manifestantes y la policía disolvió las protestas con cañones de agua bajo un frío intenso.

EN SÍNTESIS

La degradación ambiental perjudica más a los pobres que a otras personas.

Los daños en el entorno son mayores allí donde la brecha entre quienes poseen poder político y económico y quienes carecen de él es más profunda.

Un nuevo ecologismo ayuda a proteger a las poblaciones marginadas que padecen los daños ambientales derivados de las actuaciones que benefician a otros.

La tribu temía que una fuga del oleoducto, al pasar por la reserva hídrica del río Misuri, pudiera contaminar su suministro de agua. Los activistas climáticos se unieron a la protesta para combatir la creciente extracción de combustibles fósiles. Los partidarios del proyecto, valorado en 3800 millones de dólares, alegaban, por un lado, que salvaría la economía de la industria petrolífera al ser menos costoso que la alternativa de transportar el crudo por vía férrea; por otro lado, su construcción generaría puestos de trabajo, con



James K. Boyce es profesor emérito de economía e investigador en el Instituto de Investigación de Economía Política de la Universidad Amherst de Massachusetts. Es autor de *Economics for people and the planet: Inequality in the era of climate change*, Anthem Press, 2018.



el consiguiente efecto multiplicador en la economía local. No obstante, dado que el precio del petróleo se fija en los mercados mundiales, el ahorro de costes no implicaría necesariamente un precio más bajo para los consumidores, aunque sí reportaría un beneficio mayor a los productores.

Hacia diciembre de 2016, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos anunció que rechazaría la construcción del oleoducto, una decisión celebrada por los detractores del proyecto. Pero cuatro días después de tomar posesión de su cargo en enero, el presidente Donald Trump cambió las regulaciones y al cabo de unos meses el petróleo comenzó a fluir.

La batalla reflejaba un hecho real sencillo: cuando los que podrían beneficiarse del aprovechamiento de los recursos naturales poseen más poder económico y político que los que saldrían perjudicados, ese desequilibrio favorece la degradación ambiental. Y cuanto mayor es la desigualdad, mayores son los daños que se causan. Además, quienes tienen menos poder terminan pagando de forma desproporcionada las consecuencias del deterioro.

Ese tipo de situaciones son muy comunes en nuestro entorno. Las contaminantes centrales eléctricas y los peligrosos vertederos de residuos se localizan en barrios pobres. Las impurezas del agua potable aquejan a comunidades minoritarias. Pero ¿es esa relación entre poder y degradación ambiental realmente cierta? En caso afirmativo, ¿a qué se debe? ¿Y qué podemos hacer al respecto? En Standing Rock existía un buen equilibrio entre ambos extremos; pero la elección de Trump inclinó la balanza. No obstante, la experiencia, sumada a otros cambios recientes en el equilibrio de poderes, nos enseña que los esfuerzos para reducir las desigualdades económicas y sociales no solo benefician a las personas, sino también al ambiente.

A MAYOR DESIGUALDAD, MAYORES DAÑOS

El nexo entre el poder social y el deterioro ambiental comenzó a analizarse a fondo en la década de los noventa. Los economistas descubrieron que la relación entre la contaminación y la renta per cápita describía una curva en forma de U invertida. Compararon decenas de países proyectando valores de contaminación, tanto atmosférica como hídrica, en el eje de ordenadas, y de renta media en el eje de abscisas. Inicialmente, la contaminación incrementaba a medida que los ingresos aumentaban desde 0 dólares hasta un punto de inflexión situado en unos 8000 dólares al año. Sin embargo, después disminuía conforme seguían creciendo los ingresos. El efecto se conoció como la curva de Kuznets ambiental, por su similitud con la relación entre la desigualdad y la renta per cápita hallada en un famoso estudio realizado en 1955 por el economista Simon Kuznets.

La aparición de la curva de Kuznets ambiental supuso un respiro ante la sombría premisa de que un aumento de la producción y el consumo conllevaría necesariamente un mayor deterioro del entorno. Quizá los humanos no fueran, como dijo una vez el historiador ambiental Roderick Nash, una especie «cancerígena» cuyo desarrollo «pone en peligro al mundo entero». Siguió un acalorado debate entre los analistas que veían el crecimiento económico como la solución a los problemas ambientales y los que seguían considerándolo el origen de estos.

Ninguna de las dos posturas me convencía. Tal vez fuera porque, a los veinte años, había vivido entre algunas de las personas más pobres del mundo, en una aldea de Bangladés. De la experiencia aprendí para siempre que las sociedades humanas no pueden clasificarse de forma diáfana a partir de datos demográficos o per cápita. Muchos bangladesíes pasaban hambre, pero no porque el país tuviera demasiados habitantes o porque escasearan los alimentos. Pese a que había suficiente comida para todos, las comunidades morían de hambre porque los pobres carecían del poder adquisitivo para comprarla en el mercado o del poder político para obtenerla de otro modo. En su libro *Poverty and famines*, publicado en 1981, el economista Amartya Sen explica que las hambrunas suelen derivar de realidades similares. El reparto desigual de la riqueza y el poder parece condicionar enormemente el mejor o peor funcionamiento de las sociedades.

Cavilando sobre las curvas de Kuznets, la original y la ambiental, se me ocurrió que era la desigualdad, y no la renta per cápita, el factor que podría ocultarse tras la degradación ambiental, ya que ambas parecen aumentar y decrecer a la par. Cuando, junto con el entonces doctorando Mariano Torras, volvimos a analizar los datos de la curva ambiental de Kuznets en 1998, averiguamos que los países con bajos índices de alfabetización adulta, menos derechos políticos y libertades civiles, y mayor desigualdad de ingresos (que definimos como indicadores de una distribución menos equitativa del poder) tendían a presentar una mayor contaminación del aire y del agua. Una vez controlados esos factores, el efecto aparente de la renta per cápita se debilitaba y, en el caso de algunas sustancias contaminantes, desaparecía por completo. También hallamos que una mayor desigualdad se asociaba a un menor acceso al agua potable y a las infraestructuras sanitarias, dos elementos cruciales para el bienestar ambiental y humano.

En un estudio de seguimiento que realicé junto a otros colaboradores en 1999, examinamos los 50 estados de EE.UU. Analizamos la relación entre la solidez de las normativas ambientales públicas y el reparto del poder, empleando como indicadores el índice de participación electoral, el porcentaje de adultos que completan la enseñanza secundaria, la equidad tributaria y el acceso a la asistencia médica. Descubrimos que la existencia de una mayor desigualdad se relacionaba con unas normativas ambientales más débiles, y estas, a su vez, con una mayor degradación ambiental y una peor salud pública. Los resultados indicaban que la desigualdad perjudica a la salud no solo a causa del estrés fisiológico, la violencia y el deficiente acceso al sistema sanitario (todo ello documentado por investigadores de salud pública), sino también de las repercusiones en el ambiente.

Inicialmente, nuestros hallazgos fueron recibidos con notable frialdad. En la década de los noventa, cuando los mercados libres y la desregulación hacían furor, las preocupaciones sobre la desigualdad fueron ignoradas por considerarse anticuadas e incluso ingenuas. Según un revisor, estábamos haciendo leña del árbol caído.

Sin embargo, a comienzos de nuestro siglo, la desigualdad resurgió como problema político esencial. La creciente brecha entre el «1 por ciento» y el resto de la población mundial, las trágicas consecuencias del huracán Katrina para los habitantes más pobres de Nueva Orleans y los trastornos económicos tras la crisis financiera de 2008 sirvieron para reintegrarla en el orden del día. Al mismo tiempo, aumentaban las pruebas de que la mayor concentración de la riqueza y del poder político deriva en una peor protección ambiental, y no solo en términos de contaminación atmosférica o hídrica. Se descubrió que la proporción de plantas y animales amenazados o en peligro de extinción es mayor en países con una distribución menos equitativa de los

ingresos. Los índices de deforestación aumentan en países con una mayor corrupción. La inversión pública en investigación y desarrollo ambiental y en patentes sobre innovación en cuestiones ambientales es más baja en naciones industriales con rentas per cápita más dispares. Una mayor desigualdad también está ligada a unas mayores emisiones de carbono por persona y por unidad de producto interior bruto.

Tales hallazgos tienen sentido si se tiene en cuenta que, con una menor desigualdad, la población se halla en mejores condiciones de defender los recursos eólicos, hídricos y naturales de los que depende su salud y bienestar. La protección del ambiente y la mitigación de la desigualdad van de la mano.

EL PODER MANDA

En cualquier tipo de actividad que degrade el ambiente hay ganadores y perdedores. Unos salen beneficiados —si no, nadie emprendería tal actividad—, mientras que otros pagan el coste —de lo contrario, la degradación no se consideraría un problema—. Lo cual suscita una pregunta elemental: ¿por qué quienes se benefician de tales actividades imponen costes ambientales sobre otras personas?

Existen tres posibles respuestas, todas ellas relacionadas con la desigualdad de poder. Una es diferir los costes y que carguen con ellos las futuras generaciones, que no están hoy presentes para defenderse. En tales casos, como cuando pensamos en las repercusiones del cambio climático a largo plazo, el único modo de salvaguardar el ambiente consiste, para quienes todavía estamos vivos, en ser responsables hacia aquellos «cuyo rostro todavía se halla bajo el suelo —los nonatos de la futura Nación—», en palabras de la Constitución iroquesa.

Una segunda respuesta posible es que las personas perjudicadas no sean conscientes de estar sufriendo un perjuicio o de su procedencia. Puede que reparen, por ejemplo, en que sus hijos enferman, pero no en que la causa de ello radique en las emisiones de una refinería o una central eléctrica cercana. En tales casos, la solución estriba en facilitar un mayor acceso al conocimiento y, en particular, en desarrollar unas normativas que garanticen el derecho de los ciudadanos a informarse sobre riesgos ambientales y sus causas.

La última posibilidad es que, aun cuando la población sea consciente de que está cargando con el peso del coste ambiental y conozca, además, el origen de este, carece del poder económico y político necesario para imponerse en decisiones sociales relacionadas con el uso y el abuso del ambiente. Standing Rock lo ejemplifica. Para solucionar tales casos deben modificarse los equilibrios de poder.

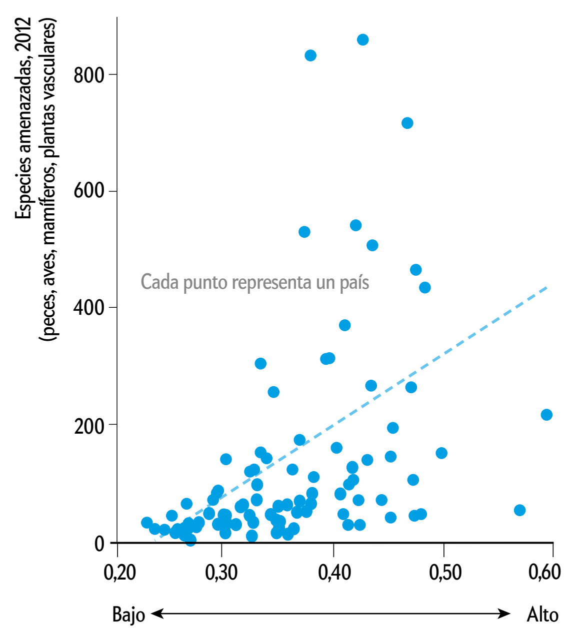
Las decisiones gubernamentales que afectan al ambiente requieren con frecuencia un análisis de costes y beneficios: ¿cuánto beneficio se prevé obtener y qué precio hay que pagar? En ese cálculo, el poder económico (también conocido como poder adquisitivo) desempeña una función fundamental. En la práctica, los individuos con más dinero cuentan con más «votos».

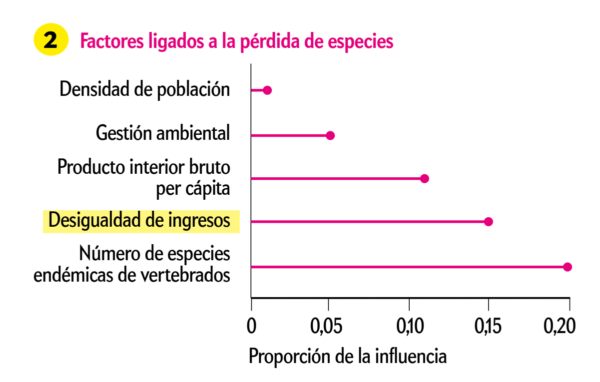
Cuando las personas que podrían resultar perjudicadas tienen escaso poder político, o ninguno en absoluto, los responsables de tomar decisiones pueden menospreciar o ignorar los costes. Un ejemplo extremo lo ofrece el reciente análisis de costes y beneficios realizado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para derogar el Plan de Energía Limpia. La Agencia asignó valor nulo a todas las repercusiones ambientales que no afectaran a Estados Unidos, con el razonamiento de que el perjuicio causado a quienes no se hallaran

A MAYOR DESIGUALDAD, MENOS ESPECIES

Numerosos estudios demuestran que, cuanto más profunda es la brecha entre ricos y pobres, más aumenta el alcance de los daños ambientales. Un análisis ha hallado que los países con mayor desigualdad de ingresos también presentan mayores índices de especies catalogadas como amenazadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (1). Un informe independiente ha determinado que la pérdida de especies se correlaciona más estrechamente con la desigualdad de los ingresos que con otros factores relevantes, como la densidad de población e incluso la gestión ambiental (2). Solo el número total de especies endémicas tiene una influencia mayor.







en el territorio nacional no debería tener cabida en la política climática estadounidense.

El poder adquisitivo y el político tienden a correlacionarse: los más adinerados suelen ejercer una mayor influencia política, y viceversa. Su efecto conjunto puede evaluarse mediante un concepto que describo como la norma de las decisiones sociales ponderadas según el grado de poder: el peso adjudicado a los costes y los beneficios de las actividades que degradan el ambiente depende del poder que poseen los individuos que sacan partido de ellas. Cuando los beneficiados por esas actividades nocivas son ricos y poderosos en comparación con quienes salen perjudicados, las decisiones sociales favorecen más a los ganadores que a los perdedores. Cuanto más profunda sea la brecha

FUENTES: «INEQUALITY AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY», POR S. NAZRUL ISLAM. DEPARTAMENTO DE ASUNTOS SOCIALES Y ECONÓMICOS DE LAS NACIONES UNIDAS. DOCUMENTO DE TRABAJO N.º 145. NACIONES UNIDAS, AGOSTO DE 2015 (*número de especies amenazadas*); «A CROSS-NATIONAL ANALYSIS OF HOW ECONOMIC INEQUALITY PREDICTS BIODIVERSITY LOSS», POR TIM G. HOLLAND, GARRY D. PETERSON Y ANDREW GONZALEZ EN *CONSERVATION BIOLOGY*, VOL. 23, N.º 5, OCTUBRE DE 2009 (*factores ligados a la pérdida de especies*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*)



EL RECHAZO al oleoducto Dakota Access en Dakota del Norte por parte de los nativos americanos, preocupados por la contaminación de su suministro de agua, acabó convirtiéndose en una protesta a escala nacional contra las corporaciones y los políticos que poseen más poder que las comunidades injustamente afectadas.

JIM WATSON, GETTY IMAGES

entre ricos y pobres y entre quienes poseen más y menos poder, mayor alcance tendrá la degradación ambiental.

La desigualdad de poder también acentúa la indiferencia hacia las futuras generaciones y la ignorancia de los costes ambientales. En los casos de un acusado desequilibrio, los imperativos de la supervivencia diaria de los más pobres podrían eclipsar su preocupación por el mañana; entre los más ricos, el miedo a que su dominio termine extinguiéndose puede causar la adopción de estrategias consistentes, por ejemplo, en explotar los recursos naturales y salir corriendo (pensemos en la voraz deforestación del sureste asiático durante las décadas de los sesenta y setenta bajo dictadores como Ferdinand Marcos, en Filipinas, y Suharto, en Indonesia). Además, cuando la disparidad es muy amplia, los pobres tienden a carecer de acceso a la información y a desconocer, por tanto, la índole y el origen del deterioro ambiental que les afecta.

CARA O CRUZ

La norma de las decisiones sociales ponderadas según el grado de poder no solo predice que una desigualdad más acusada implicará un mayor deterioro ambiental, sino también que los daños causados se concentrarán en las comunidades que ocupan el extremo inferior del espectro de riqueza y poder. Allí, a ojos de los responsables políticos, los costes ambientales pesan menos. Las minorías raciales y étnicas, así como las comunidades con bajos ingresos, son las que se encuentran expuestas a un mayor riesgo. La reserva Standing Rock, donde el 40 por ciento de los residentes se halla por debajo del umbral de pobreza del país (el triple del índice nacional), era vulnerable en ambos aspectos.

Paralelamente, las ventajas de las actividades perjudiciales para el ambiente, a saber, un mayor beneficio para los productores y unos precios más bajos para los consumidores, se concentran en el extremo superior del espectro económico. Los beneficios fluyen hacia accionistas y ejecutivos, unos individuos generalmente acaudalados. Por otro lado, cuanto más gasten los consumidores, más podrán aprovecharse de la reducción de los precios, lo que, a su vez, incrementa los beneficios de la clase pudiente.

Con ello no queremos insinuar que los más adinerados no deseen tener un ambiente limpio y seguro. Pero, en gran medida, la calidad ambiental es lo que los economistas denominan un bien público impuro, es decir, un bien del que no todos pueden gozar por igual. Los más acomodados pueden permitirse vivir en lugares más limpios, comprar agua embotellada, disponer de aire acondicionado y disfrutar de mejores servicios médicos. También pueden oponerse de forma más eficaz a que sus barrios queden amenazados por riesgos ambientales. Al hallarse más alejados de esas amenazas, les resulta más sencillo ignorarlas. Aun sin poder eludir por completo las consecuencias de la degradación ambiental, cargan con un porcentaje pequeño de los costes, en comparación con los beneficios de los que disfrutan.

INJUSTICIA AMBIENTAL

Desde la década de los ochenta, los investigadores han documentado sistemáticamente la desproporcionada exposición a los riesgos ambientales de las minorías raciales y étnicas, así como de las comunidades con bajos ingresos de EE.UU. En uno de sus primeros trabajos, el sociólogo Robert Bullar examinó la distribución espacial de los residuos peligrosos en Houston y concluyó que se emplazaban principalmente en barrios de afroamericanos.

Los estudios posteriores han revelado tendencias similares en numerosas regiones del país: la raza y la etnia se correlacionan estrechamente con la proximidad y la exposición a los daños ambientales. Los expertos también han investigado cómo explicar tales correlaciones. Una de las controversias gira en torno al orden cronológico: ¿se decide desde el principio situar las infraestructuras peligrosas en comunidades con menor riqueza y poder? ¿O, tras el emplazamiento de una infraestructura, se mudan a otro lugar los residentes más ricos y, al devaluarse la propiedad, los pobres se trasladan a esa zona? Los pocos estudios que han profundizado en esta cuestión han hallado pruebas só-

lidas de que las instalaciones tóxicas se ubican desde un primer momento en comunidades con menos poder. Los datos también demuestran que, cuando la clase pudiente abandona un lugar tras la construcción de una infraestructura, la tendencia ya había comenzado antes. Por tanto, las comunidades en transición son más vulnerables a la imposición de riesgos ambientales.

La mayor exposición a la contaminación perjudica especialmente a los niños, lo que se manifiesta en un mayor índice de mortalidad infantil, un bajo peso al nacer, una mayor incidencia de trastornos del desarrollo neurológico, ataques de asma más frecuentes e intensos y un mayor fracaso escolar. En los adultos, se relaciona con la pérdida de días laborables debido a enfermedades y a la necesidad de cuidar de los hijos enfermos. Con el tiempo, las repercusiones en la salud acentúan aún más la disparidad responsable de la mayor vulnerabilidad de las comunidades a los daños ambientales.

Aunque las consecuencias son de mayor gravedad para las comunidades en riesgo, a menudo afectan a un espectro más amplio de poblaciones. Las áreas metropolitanas de EE.UU. con una mayor segregación racial y étnica entre sus residentes tienden a presentar un mayor riesgo de contraer cáncer debido a que la contaminación del aire afecta a todos por igual, no solo a una raza o etnia. En el cinco por ciento de las ciudades estadounidenses con mayor disparidad racial y étnica, por lo que respecta a exposición a contaminantes atmosféricos de origen industrial, la exposición media de los blancos no hispanos es notablemente mayor que en las poblaciones con una menor desigualdad. La justicia ambiental beneficia a todos.

La falta de equidad ambiental se halla en cualquier parte. En Inglaterra y Holanda, los barrios más pobres y con más habitantes que no son de raza blanca presentan mayores concentraciones atmosféricas de partículas sólidas y óxidos de nitrógeno, que agravan los problemas respiratorios. En Deli, cuyos habitantes respiran uno de los aires más sucios del planeta, los pobres viven en los barrios más contaminados. También pasan más tiempo trabajando al aire libre, por ejemplo, al borde de las carreteras, donde la contaminación atmosférica alcanza los valores más extremos. No pueden permitirse tener aparatos de aire acondicionado o purificadores. Además, se benefician menos de la generación de energía, del transporte y de otras industrias contaminantes.

La norma de las decisiones sociales ponderadas según el grado de poder también opera a escala internacional. Los daños ambientales se infligen indebidamente en los países más pobres. En un memorándum de 1991, Lawrence Summers, entonces economista principal del Banco Mundial, escribió que «la lógica económica detrás del vertido de un residuo tóxico en el país con la menor renta per cápita es impecable», ya que allí se minimizan las pérdidas de ganancias a causa de enfermedades y fallecimientos. Su afirmación pudo parecer irónica, pero la práctica ambiental a menudo sigue ese guion. Cada año, los países industriales avanzados envían millones de toneladas de residuos tóxicos a naciones con escasos ingresos de África, Asia y América Latina.

El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, un acuerdo ambiental internacional que entró en vigor en 1992, ha resultado ser inadecuado para detener ese flujo. La brecha entre quienes se benefician de las actividades económicas generadoras de desechos y quienes pagan los costes de su eliminación da una penosa vuelta de tuerca al dicho «ojos que no ven, corazón que no siente».



EL NUEVO ECOLOGISMO

¿Qué podemos hacer, entonces, para reducir la desigualdad, tanto social como ambiental, y mitigar así los daños causados a la población y al planeta?

La relación entre la desigualdad y la salud ambiental es bidireccional. Un reparto más equitativo de la riqueza y el poder facilita la obtención de un entorno más verde. Y los esfuerzos para promover el derecho a un ambiente limpio y seguro facilitan que se alcance una mayor igualdad. La clave para obtener ambos logros reside en una movilización activa en defensa del cambio.

El objetivo del ecologismo estadounidense durante el siglo XX se centraba en proteger la naturaleza de las manos del hombre. A menudo, las élites ilustradas se consideraban las defensoras de la naturaleza ante las masas irresponsables. De ahí solo quedaba un pequeño paso hasta asumir el inexorable compromiso entre la protección ambiental y un bienestar económico general.

En el siglo XXI somos testigos de la aparición de un nuevo ecologismo cuyo objetivo consiste en proteger a los individuos perjudicados de aquellos que se benefician de la degradación. El equilibrio de poder entre ambos bandos cambia con el tiempo. Cuando los activistas climáticos de EE.UU. se unieron a los nativos americanos de Standing Rock para defender su derecho a un ambiente limpio y seguro, la balanza del equilibrio de poder comenzó a moverse. Basándose en los logros anteriores de otros movimientos surgidos por todo el país en defensa de la igualdad de derechos y de la protección ambiental, los manifestantes estuvieron a punto de detener una iniciativa multimillonaria.

En otros casos menos mediáticos, el nuevo ecologismo ha obtenido victorias importantes. En el estado de Washington, los activistas lograron impedir la construcción de una terminal de exportación de carbón que habría sido la mayor del país, y con ello protegieron los terrenos y las aguas de las comunidades tribales. En Oakland, California, el proyecto de otra terminal de carbón quedó inicialmente abortado por acción de una coalición de abogados expertos en derecho ambiental, laboral y económico, pero todavía existen escollos legales. En Montana, la Nación Pies Negros consiguió la cancelación de arrendamientos de energía en 9300 hectáreas, la culminación de una lucha de treinta años.

Los estrechos vínculos entre la desigualdad y la calidad del ambiente han desembocado en el reconocimiento cada vez mayor de que si queremos reequilibrar las relaciones humanas con la naturaleza, debemos reequilibrar también las relaciones entre nosotros.

PARA SABER MÁS

Inequality and environmental protection. James M. Boyce en *Inequality, Cooperation, and environmental sustainability.* Editado por Jeanmarie Baland, Pranab Bardhan y Samuel Bowles. Princeton University Press, 2006.

The haves, the have-nots, and the health of everyone: The relationship between social inequality and environmental quality. Lara Cushing et al. en *Annual Review of Public Health*, vol. 36, págs. 193-209; marzo de 2015.

Economic inequality and the value of nature. Moritz A. Drupp et al. en *Ecological Economics*, vol. 150, págs. 340-345; agosto de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Población, pobreza y entorno local. Partha S. Dasgupta en *IyC*, abril de 1995.

por Marc Boada Ferrer



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

Cómo construir un sensor de efecto Hall con bismuto

Este metal tan raro y singular es el perfecto aliado para medir el campo magnético de superimanes permanentes

CRISTAL de bismuto.

En la última entrega nos adentramos en la construcción de potentísimos imanes permanentes [*véase* «Superimanes permanentes», por Marc Boada; Investigación y Ciencia, septiembre de 2018]. Pero de nada nos sirve esa potencia si no podemos medirla. Asimismo, anunciábamos que con esos imanes podríamos estudiar diversos fenómenos, y, en todos los casos, el conocimiento sobre la intensidad del campo magnético será esencial.

Por ello hemos decidido dedicar esta columna al estudio y aplicación de uno de los fenómenos magnetoeléctricos más fecundos: el efecto Hall. Observado por primera vez por Edwin Herbert Hall en 1879 (18 años antes del descubrimiento del electrón) mientras realizaba su tesis doctoral, corresponde a una manifestación mesurable de la fuerza de Lorentz. En presencia de un campo magnético, las cargas en movimiento desvían su trayectoria debido a la denominada fuerza de Lorentz, que es perpendicular al movimiento de estas y a la dirección del campo magnético. Al desviarse, las cargas se acumulan a los lados del material y crean una diferencia de potencial que se puede medir.

La construcción de un sensor de efecto Hall es relativamente sencilla, al menos sobre el papel (*véase el esquema eléctrico de la página siguiente*). Se toma una plaquita metálica tan delgada como sea posible, se recorta en forma de rectángulo alargado y se sueldan unos electrodos en el centro de cada uno de sus cuatro lados. Los dos situados en los lados cortos se conectan a una fuente de alimentación. Los otros dos se conectan a un voltímetro muy sensible. De entrada, el voltímetro no marca nada. Pero tan pronto como la plaquita se ve sumergida en el seno de un campo

COLDMOON PHOTO/ISTOCK

magnético, aparece un cierto voltaje, proporcional a la intensidad del primero. Ello le capacita como sensor para la medida de campos magnéticos de distintas intensidades. Como ya hemos avanzado, este voltaje secundario, o tensión de Hall, responde al encorvamiento que experimentan las trayectorias de los portadores de carga bajo el campo magnético de un imán. En la práctica, el valor de la tensión de Hall no depende solo de la intensidad del campo magnético, sino también de las dimensiones de la plaquita y de los materiales con que esta ha sido construida, ya que cada conductor tiene una constante de Hall característica.

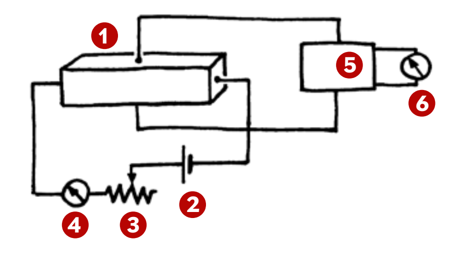


EL METAL MÁS DIAMAGNÉTICO: Una barrita de bismuto se orienta de forma perpendicular al campo magnético de un imán de herradura.

En nuestro caso, construiremos un sensor de efecto Hall a partir de una plaquita de bismuto, un raro semimetal que podremos conseguir sin grandes dificultades. Este metal suavemente rosado posee juntas tantas características únicas que resulta muy singular. De hecho, ya apareció en estas páginas porque forma bellísimos cristales artificiales [*véase* «Materia cristalina», por Marc Boada Ferrer; Investigación y Ciencia, mayo de 2014]. Y es precisamente su belleza lo que hace que, pese a ser escasísimo, pueda encontrarse en tiendas de minerales en forma de bonitos cristales iridiscentes. Ello nos permite tener, a un precio más que razonable, una muestra de un elemento químico con varios récords.

Veamos por qué el bismuto es tan especial. Para empezar, se trata del elemento estable más pesado (con más protones y neutrones) de la tabla periódica. Dicen de él que su desintegración espontánea es tan lenta, que será el último elemento químico que quede en el universo. En estado puro, si bien tiene poquísimas aplicaciones prácticas, posee un gran interés científico, ya que en su seno los portadores de carga muestran una alta movilidad y una escasa densidad. A escala macroscópica es escandalosamente —para ser un metal— frágil, lo que lo hace poco adecuado para aplicaciones técnicas —y eso que posee otras cualidades que sí son prácticas: es casi tan denso como el plomo pero mucho menos tóxico—. Por otro lado, su conductividad eléctrica es de las más bajas entre los metales y su conducción térmica tan reducida que casi puede considerarse un aislante térmico. Y la cosa no acaba aquí. Su coeficiente de dilatación es importante y negativo, es decir, que al enfriarse se expande de forma notable, como el agua. Remataremos esta prolija descripción añadiendo que el bismuto manifiesta una notable facilidad para formar aleaciones de muy bajo punto de fusión, a las cuales aporta, además, una retracción térmica casi nula, de forma que en estado líquido sus aleaciones rellenan los moldes con una precisión envidiable.

Centrémonos ahora en las propiedades que nos interesan hoy y aquí: las magnéticas. El bismuto es, de entre todos los metales puros, el más diamagnético. Ello significa que, en presencia de un imán, tiende a huir de las líneas del campo magnético. Esto puede observarse fácilmente fundiendo una barrita de bismuto y colocándola ante uno de nuestros superimanes permanentes. Suspenderemos la barrita de un fino hilo y, tras unos minutos de espera (hasta que permanezca quieta), acercaremos el imán. Comprobaremos que la barrita se coloca siempre perpendicular a la cara de este último, exactamente lo contrario de lo que ocurre con los materiales ferromagnéticos como el hierro. Para terminar, diremos que el bismuto es óptimo para el experimento que aquí proponemos porque posee el coeficiente de Hall más elevado de entre todos los metales puros.



Esquema eléctrico del sensor de efecto Hall

1. Plaquita de bismuto
2. Fuente de alimentación
3. Resistencia
4. Tensión de alimentación (voltímetro)
5. Amplificador de la tensión de Hall
6. Voltímetro para medir la tensión de Hall

De cara a la construcción de un dispositivo de efecto Hall que nos permita su uso a modo de gausímetro o teslámetro, visitaremos una tienda de minerales y nos proveeremos de algunos cristales. Una vez en el laboratorio, el primer paso consistirá en preparar la plaquita. Para empezar, debemos tener en cuenta que, cuanto más delgada sea esta, mayor será el voltaje que podremos medir. Por tanto, el primer objetivo será fabricar una placa muy delgada.

Durante años me esforcé en preparar las placas de bismuto mediante los métodos tradicionales. Se funde un pequeño lingote, con una sierra de cinta se recorta una tira ya delgada y finalmente se rebaja lijando con gran precaución. Este método, delicado y tedioso pero útil con metales de mayor punto de fusión, lo abandoné tan pronto como descubrí que otros muchos experimentadores fabricaban, casi en serie, placas delgadísimas mediante un procedimiento mucho más sencillo: dejar caer gotas de bismuto fundidas sobre un cristal limpio y frío.

El método es simple. Improvisamos una lingotera con chapa de aluminio delgada y unas dimensiones de $5 \times 5 \times 25$ o 30 milímetros de longitud. Fundimos el bismuto en una cucharilla de acero inoxidable que calentaremos con un mechero Bunsen y lo volcamos en ese molde. Una vez frío, lo extraemos para fijar la barrita en un estator de laboratorio que situaremos en un banco de trabajo. Finalmente, colocamos un cristal bajo la barrita, aproximadamente a un metro de distancia. A continuación, y con un pequeño soplete, calentamos el extremo libre de la barra hasta que funda y dejamos que las gotas caigan sobre el cristal. Las gotas se enfriarán rápidamente, con lo que la estructura cristalina estará compuesta de pequeños cristales y la lámina obtenida será relativamente maleable. Luego, con un cúter o bisturí bien afilado, recortaremos una plaquita de unos 10 o 15 milímetros de longitud y 4 o 5 de ancho. El espesor dependerá de la altura de caída. En

DIBUJO Y FOTOGRAFÍAS DE MARC BOADA FERRER



DE LINGOTE A PLAQUITA: Un forma sencilla de obtener placas metálicas muy delgadas.

nuestro caso, será de aproximadamente una décima de milímetro.

Pero, ¿por qué es tan importante que la plaquita sea muy delgada? El motivo radica en uno de esos raros fenómenos de superficie. El campo magnético no penetra en profundidad, de forma que si la plaquita fuera espesa muchos de los portadores de carga que circulan por ella no se verían afectados. Reducir el espesor significa concentrar los portadores en una sección mucho menor y mucho más próxima al campo magnético. (En realidad, la explicación última de toda la fenomenología de Hall requiere del concurso de la física cuántica, pero eso escapa al objetivo de esta sección. Continuemos, pues, con la construcción de nuestro sensor.)

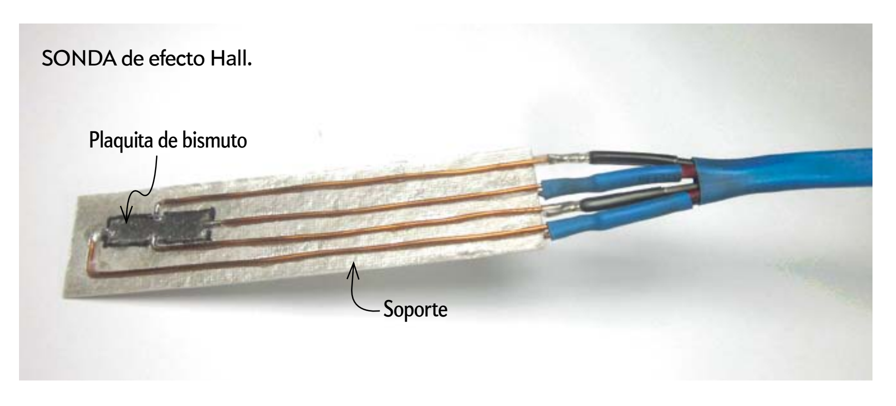
Una vez cortada, fijaremos la plaquita de bismuto sobre un soporte que debe ser resistente a las soldaduras que se avecinan. En mi caso utilizo placa aislante de mica comprimida, una placa de circuito impreso pre-taladrada o incluso un portaobjetos de vidrio resistente al calor. La fijación de la plaquita sobre el soporte podemos hacerla con cianocrilato, que resiste bastante bien el calor. Prepararemos luego los electrodos. Para ello tomaremos finos hilos de cobre, estañaremos delicadamente sus extremos y los pegaremos al substrato de forma que queden perfectamente posicionados. Luego, con un soldador para componentes electrónicos, soldaremos los extremos de los cables justo en el centro de cada una de las caras. Los extremos aun libres los soldaremos a su vez con cables más gruesos, que conectaremos a la fuente de alimentación y al voltímetro para medir el potencial de Hall.

El siguiente paso será preparar la fuente de alimentación que creará la tensión principal. Algunos experimentadores lo que hacen simplemente es aplicar una tensión tan elevada como permite el circuito. Expliquémonos. Conectamos los electrodos de entrada a la plaquita a una fuente de alimentación que nos permita variar el voltaje y medir la intensidad. Gradualmente, elevamos la tensión hasta que, a determinado amperaje, la plaquita funde. Verificada la tensión máxima que puede soportar, se prepara un nuevo sensor idéntico al que hemos inutilizado y se somete a una tensión eléctrica ligeramente inferior.

Un segundo método consiste en poner en serie con la plaquita una resistencia que limite el paso de corriente proveniente de una fuente de alimentación de corriente continua. En función de las características de esta última, servirá una simple bombilla de linterna, una resistencia cerámica de pocos ohmios o, como en mi caso, un palmo de cinta de nicromo que extraje de una tostadora de pan y que mostraba una resistencia de poco más de 4 ohmios. Estabilicé la tensión a 12 voltios, con lo que circulaba una corriente de más de 2,5 amperios. Pese a que no fundía, la plaquita se calentaba notablemente, cosa que siempre produce efectos adversos. El motivo es simple: el calor es ruido, desorden y aumenta la resistencia eléctrica de los circuitos, incluida la plaquita. Además, conforme aumenta la temperatura, la corriente de Hall deriva y enmascara los valores reales. Para rematar, el gradiente de temperatura en el sensor produce una termotensión eléctrica entre las zonas más frías y las más calientes. Ello puede comprobarse durante el proceso de soldadura de los electrodos. Si, mientras soldamos los electrodos y para verificar su correcta continuidad eléctrica, medimos la resistencia, observaremos que esta se incrementa cuando aplicamos el soldador. Al cesar el calor, los valores retornan a la estabilidad y a sus niveles reales.

Una vez más, aparecen múltiples fenómenos relacionados. Sin darnos cuenta, hemos entrado en el paraíso de los fenómenos termo-eléctrico-magnéticos. Hoy nos centramos en el efecto Hall, pero este es solo la punta del iceberg. Existen efectos curiosísimos que se suman al que hoy nos ocupa. Por ejemplo, al circular una corriente en un conductor y someter este a un campo magnético perpendicular, aparece un gradiente de temperatura transversal, minúsculo pero real. Por otro lado, si un conductor es sometido a un flujo de calor y a un campo magnético perpendicular, aparece un potencial, una fuerza electromotriz, sobre el tercer eje. Y podríamos seguir con más ejemplos (insistimos, calor, campo magnético y portadores de carga se interrelacionan continuamente). Por todo ello, vale la pena mantener el sensor a tan baja temperatura como podamos.

Una estrategia consiste en montar el sensor sobre un radiador de aluminio procedente de un ordenador en desuso. O refrigerarlo mediante tubos térmicos que recuperaremos de algún ordenador portátil. O, mejor todavía, montar la plaquita sobre una célula Peltier y mantener constante su temperatura. En todos estos casos, el sensor será estático y nos servirá



SONDA de efecto Hall.

para colocar sobre su superficie distintos imanes y estimar su campo magnético, como si de un gausímetro se tratara. Pero para llegar a ello hay que efectuar medidas de cierta precisión, y a estas alturas ni siquiera hemos empezado.

Pongamos manos a la obra y conectemos nuestro mejor voltímetro a los electrodos laterales de la plaquita. Seleccionemos la escala de milivoltios, conectemos la fuente de alimentación y empecemos a experimentar.

Lo primero que observaremos será que, aun en ausencia de campo magnético exterior, aparece un cierto voltaje de Hall. En un experimento típico, con una plaquita de 16 × 4 × 0,1 milímetros, alimentada a 12 voltios, esa tensión «de base» tiene un valor de unos 9 milivoltios. Ahora coloquemos sobre la sonda un buen imán permanente, por ejemplo, de 3 centímetros de diámetro y 2 de espesor. La tensión de Hall subirá varios milivoltios, a veces hasta los 14 o 15. Giremos el imán, exponiendo a la sonda el otro polo magnético: el valor de la tensión de Hall disminuirá hasta los 7 milivoltios.

Si construimos varios dispositivos de características similares, comprobaremos que los resultados son relativamente constantes y que se alejan solo algunos milivoltios de la norma. Por ello, si realmente queremos dar aplicación práctica al aparato, hay que utilizar un amplificador de tensión. Varias posibilidades se abren ante el experimentador: los clásicos sacarán su osciloscopio de las estanterías; los más avanzados encontrarán en el Arduino una gran salida; los menos avezados a la técnica pueden construir un amplificador clásico con algunos transistores, y quien esto escribe optó por encargarlo a un amigo electrónico de profesión. El instrumento que llegó a mis manos es de poca ganancia, solo un factor 10, pero de gran estabilidad y proporcionalidad.

Pasemos finalmente al uso del aparato. Coloquemos la sonda sobre distintos imanes de neodimio. Observaremos fuertes fluctuaciones de los valores de la tensión de Hall y, como es lógico, nuestro deseo será calibrar el instrumento. Para ello contrastaremos los valores que nos proporciona con un gausímetro comercial, algo que podremos hacer con la ayuda de algún suministrador de imanes.

Pero para quien no tenga esa oportunidad, damos aquí algunos valores de referencia: un imán de neodimio en forma de disco de 25 milímetros de diámetro y 3 de espesor tiene un campo en el centro de sus caras de 2400 gauss, uno de 30 milímetros por 10 de espesor alcanza unos respetables 3500 gauss, y finalmente, uno de 60 milímetros y 5 de espesor alrededor de 1000 gauss. Con estos valores y algo de trabajo por nuestra parte obtendremos un instrumento que nos permitirá estimar con cierta precisión la potencia de nuestros imanes y descubrir el fascinante mundo de las interacciones entre la electricidad y el magnetismo.



LOS EJEMPLARES DE
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
FORMAN VOLÚMENES DE INTERÉS PERMANENTE

Disponibles las tapas del año 2018

Para efectuar tu pedido:

934 143 344
administracion@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es/catalogo

Para que puedas conservar y consultar mejor la revista, ponemos a tu disposición tapas para encuadernar los ejemplares.



José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.

HISTORIA DE LA CIENCIA

Pasteur, el científico prudente

El nacimiento de la vacunación moderna vino marcado por los temores y las precauciones de su inventor

José Manuel Sánchez Ron

RECONSTRUIR EL PASADO ES TAREA COMPLEJA Y RESBALADIZA. NO IMPORTA QUÉ VERTIENTE de ese pasado nos interese, ya sea la política, económica, social, científica, religiosa... Es seguro que el tiempo borrará innumerables detalles, que acaso serían muy relevantes a la hora de entender qué y por qué sucedió lo que ocurrió. El pasado es como el agua que se arroja sobre una malla: deja un recuerdo al humedecerla pero el agua la atraviesa perdiéndose inexorablemente.

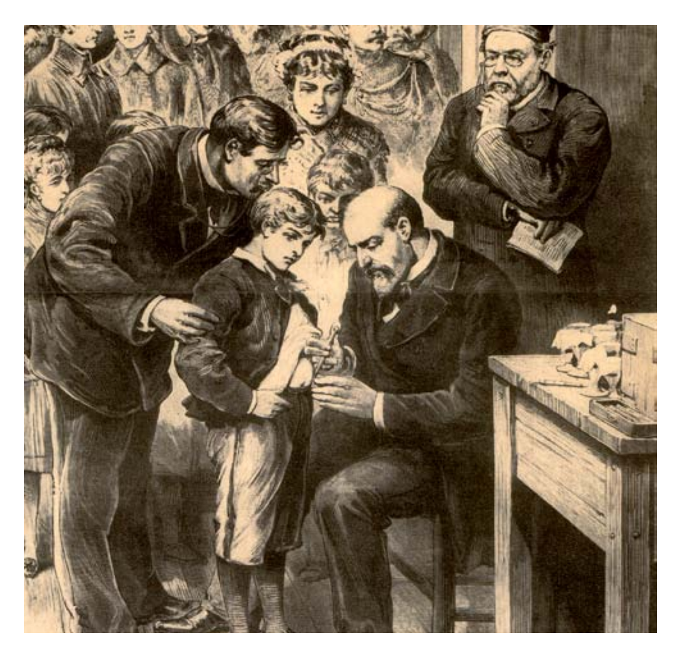
Los historiadores se basan sobre todo en fuentes escritas publicadas (o que aparecen inscritas en monumentos, templos, restos arqueológicos o lápidas). Pero existe otro tipo de fuente: las correspondencias. Las cartas (hoy convertidas la mayoría en correos electrónicos) no buscan una audiencia extensa, sino que suelen estar dirigidas a un único destinatario. Y tienen la inapreciable virtud de que pueden reflejar mejor, de forma más espontánea, los pensamientos y situaciones vitales del autor. No es posible entender realmente lo que hicieron y pretendieron los grandes científicos, aquellos responsables de los cambios de dirección o rupturas científicas, sin acceder a sus correspondencias privadas, algo no siempre posible, bien porque sus cartas no se conservaron, bien porque no se han localizado o porque permanecen sin publicar, inaccesibles salvo para unos pocos privilegiados (habitualmente sus descendientes). Por supuesto, también son importantes los cuadernos de notas o los informes, pero estos carecen de una de las características de las cartas, que no son sino un diálogo entre personas, del que podemos sentirnos partícipes. Con este artículo inauguro «Correspondencias», una nueva sección de *Investigación y Ciencia* que pretende resaltar esta faceta de la historia de la ciencia, ofreciendo y comentando en cada número una o varias cartas de un científico.

En la bibliografía perteneciente a la historia de la ciencia abundan las ediciones de correspondencias. Algunas se hallan todavía en curso de publicación, como la de Charles Darwin, cuyo primer volumen, que cubría el período 1821-1836, apareció en 1985; en octubre de 2017 se publicó el volumen 25 (893 páginas), que se limitaba a las cartas que Darwin envió o recibió en 1877. Como murió en 1882, quedan todavía cinco años de vida del autor de *El origen de las especies* (1859) para completar la serie. De los colosos de la ciencia de todos los tiempos, posiblemente haya sido Darwin el corresponsal más prolífico: de las cartas que escribió o recibió se conservan unas 14.000, y debieron existir muchas más que se han perdido. Semejante actividad se vio facilitada por la eficacia del sistema postal inglés: a mediados del siglo XIX, en Inglaterra se despachaban 600 millones de cartas al año, distribuidas (once repartos diarios) por 25.000 carteros.

Para comenzar esta sección he elegido a Louis Pasteur (1822-1895), uno de los nombres importantes de la historia, no ya de la ciencia únicamente, sino de la humanidad: es considerado uno de sus grandes benefactores. Su obra cubre diversos campos y fenómenos: destaca la estereoquímica, disciplina que estudia las formas tridimensionales alternativas de las moléculas a la que dedicó su tesis doctoral (1847) y en la que continuó trabajando hasta 1857; también la fermentación y la generación espontánea, que demostró que no existía (1857-1865); las enfermedades del gusano de seda (1865-1870); la elaboración de la cerveza (1871-1876), y las enfermedades infecciosas (1876-1895).



DOMINIO PÚBLICO



PASTEUR MIRA CON ANSIEDAD cómo se administra por primera vez a una persona (el niño de nueve años Joseph Meister) la vacuna antirrábica que él ha ensayado con éxito en perros.

LITOGRAFÍA DE ROGER VIOLLET

En 1880, tras aislar el microorganismo responsable del cólera de las gallinas (un mal que podía matar hasta el 90 por ciento de un gallinero), Pasteur consiguió disminuir su virulencia siguiendo la técnica que había desarrollado Edward Jenner en 1798; esto es, inyectando en las gallinas microbios debilitados. Estimulado por los resultados favorables que obtenía, aplicó el principio de la debilitación de los gérmenes para preparar vacunas contra la rabia, enfermedad infecciosa mortal, que afecta a los perros pero que también pueden contraer (mediante mordeduras de estos) las personas. Sus primeros estudios en este campo comenzaron en diciembre de 1880, cuando un veterinario le llevó dos perros rabiosos y le pidió su opinión. Solo había experimentado con perros cuando en julio de 1885 le llevaron un niño de nueve años, Joseph Meister, que había sido mordido por un perro rabioso. A pesar de no ser médico, Pasteur aceptó el desafío y experimentó la vacuna en el niño. Fue un éxito. Había nacido la vacunación moderna (la única gran modificación que se produciría posteriormente fue la introducción de vacunas obtenidas por ingeniería genética, que se iniciaron en 1983 y cuyo primer producto comercializado fue la vacuna contra la hepatitis B, en 1986).

Esta historia, la del valor y pericia de Pasteur al atreverse a tratar a Joseph Meister, se ha repetido y repetirá, justificadamente, miles de veces, pero aquí, y recurriendo a dos de las cartas que escribió, veremos otra faceta, la de sus temores y precauciones. Disponemos de su correspondencia gracias a los esfuerzos que hizo por localizarla y reunirla uno de sus yernos. Nos referimos al escritor y primer biógrafo de Pasteur René Vallery-Radot, marido de Marie-Louise, una de las cuatro hijas de Pasteur (tuvo también un hijo). Continuó esa tarea Pasteur-Vallery-Radot (así firmaba), hijo de René, quien fue responsable de la publicación, en cuatro volúmenes, de la correspondencia de su abuelo.

El 14 de diciembre de 1884, Pasteur escribía a un inidentificado «X» (*Correspondance*, vol. 3, págs. 445-446):

Señor y muy respetado colega,

Lamento profundamente no poder decirle que me traiga a París ese querido niño. No me atrevo todavía a intentar nada con el hombre. Un fracaso comprometería todo el futuro posible. ¡Ah!, si toda mordedura de un perro rabioso implicase fatalmente la muerte por la rabia, yo no dudaría. Mis experiencias de intentos por conseguir el estado refractario sobre los perros después de la mordedura van bien; pero tengo todavía muy pocos resultados. Desde hace cinco meses me he visto muy retrasado debido a dificultades imprevistas, felizmente superadas, gracias a una instalación que debe permitirme multiplicar a partir de enero mis pruebas de profilaxis.

Resumido, este es el estado de mis estudios:

Usted me dirá: aquí están veinticinco perros, ¿puede usted asegurarme que si yo hago que les muerdan perros rabiosos, podría, sin lugar a dudas, hacer a los veinticinco refractarios a la rabia antes que se desarrolle el mal, como consecuencia de la mordedura? Y yo me vería obligado a responder que no puedo contestar que ninguno de los veinticinco no sufra algún accidente de vacunación. Es solamente cuando yo pueda decir que soy capaz de vacunar con seguridad después de la mordedura a un número cualquiera de perros mordidos, cuando me atreveré a pasar al hombre. Y todavía mi mano temblará, porque lo que es posible para los perros puede no serlo para el hombre. De todas maneras, no tendré ya escrúpulos científicos.

Reciba, señor, la seguridad de mis sentimientos muy distinguidos.

L. Pasteur

Que la familia del niño no se alarme excesivamente. ¡Hay tantas mordeduras, incluso no cauterizadas, que no tienen un fin fatal! La cauterización después de 24 horas puede ser muy útil y eficaz.

No olvide, se lo ruego, escribirme cómo se porta el niño en un mes, en seis semanas y ulteriormente en dos o tres meses.

En los meses siguientes Pasteur continuó experimentando con perros. Seguía sin atreverse con personas. Una carta que escribió el 12 de junio de 1885 al alcalde de Levier (Doubs), quien le había escrito preguntándole si consentiría en cuidar a dos habitantes de esa localidad a los que había mordido un perro rabioso, así lo muestra (*Correspondance*, vol. 4, págs. 21-22):

Señor,

He recibido su carta de ayer, 11 de junio, relativa a ese niño y a su padre, mordidos los dos por un perro rabioso y sobre lo que habría que hacer.

Siento mucho informarle que todavía no puedo intentar llevar el estado refractario a la rabia a los seres humanos. Lo hago fácilmente con perros, incluso después de que han sido mordidos. No me encuentro lejos de osar hacerlo sobre el hombre pero el punto

en que se hallan mis investigaciones no me permite todavía actuar sobre el hombre.

Diga con claridad a esas bravas gentes que la mordedura de un perro rábico está lejos de anunciar siempre el mal. Tienen más de 80 buenas posibilidades sobre 100 de no adquirirlo.

Que no hagan nada, que no se dediquen a ningún remedio. No hay ninguno.

En su lugar, haga que un médico vigile atentamente a las personas a fin de identificar los menores cambios de carácter, excitación nerviosa, dolores de cabeza… y que me envíen un telegrama con las señales.

La muerte es invencible cuando comienzan los primeros síntomas, en general después de seis semanas, o dos meses. No existe entonces ningún escrúpulo para actuar y yo intentaré cualquier cosa sin dudar, aunque sepa que en este momento es muy tarde para que funcione.

Estoy desolado por no poder decir que haga venir a estas personas, pero la prudencia me ha aconsejado que los métodos muy simples que empleo no habrán recibido el perfeccionamiento que espero.

Reciba, Señor, la seguridad de mi consideración muy distinguida

L. Pasteur

Los consejos de Pasteur se siguieron y los afectados, vigilados cuidadosamente, no presentaron ninguna señal de la infecciosa rábica. Menos de un mes después, el 6 de julio, Pasteur llevaba a cabo la primera vacunación antirrábica de la historia.

El éxito obtenido con Meister atrajo al laboratorio de Pasteur a personas no solo de Francia, sino también de otras partes del mundo (sobre todo de Europa). El contenido de una carta que envió al cirujano y fisiólogo inglés Victor Horsley en agosto de 1886 nos da idea de la magnitud de ese éxito (Horsley viajó a París en 1886, como secretario de una comisión establecida por el Gobierno británico para estudiar los procedimientos de Pasteur en la inmunización contra la rabia; los experimentos que posteriormente realizó Horsley confirmaron el descubrimiento y método de Pasteur, como señaló en un informe posterior) (*Correspondance*, vol. 4, págs. 94-95):

Al 22 de agosto de 1886, han sido tratados en mi laboratorio preventivamente contra la rabia, después de mordeduras por animales que tenían rabia o que se sospechaba que la tenían:

		Mortalidad
Francia y Argelia	*1324*	*4, Pelletier, Peytel, Lagut, Clédières*
Inglaterra	*68*	*0*
Austria-Hungría	*43*	*0*
Alemania	*9*	*0*
América	*18*	*0*
Brasil	*2*	*0*
Bélgica	*50*	*0*
España	*75*	*2, Guardia Ribes (13 años) y Pita (70 años)*
Grecia	*10*	*0*
Portugal	*24*	*0*
Holanda	*14*	*1, Meulenick (13 años)*
Italia	*138*	*0*
Rusia	*186*	*8, de lobos sobre 50 tratados 4, de perros sobre 136 tratados*
Rumania	*20*	*2*
Suiza	*2*	*0*
Turquía	*2*	*0*
Bombay	*1*	*0*
Total	*1986*	*21, de los cuales 8 lo fueron por lobos. Y el resto (13) por perros*

Esto representa una mortalidad de alrededor del 1 por 100, incluyendo las mordeduras de lobos. Y una mortalidad de alrededor del 1 por 150 por mordeduras de perros.

Si no consideramos más que los 1324 tratados de Francia y Argelia, con 4 muertos, la proporción es de 1 muerto por cada 330. De manera que la proporción más baja de muertes por rabia sobre 100 mordidos que habían osado invocar las personas hostiles al descubrimiento, del 5 por ciento, es completamente errónea. En cualquier caso, incluso con esta misma proporción del 5 por 100, los 1324 mordidos de Francia y Argelia habrían correspondido a 65 muertos.

En mi comunicación del 1 de marzo de 1886 [«Résultats de l'application de la méthode pour prévenir la rage après morsure»], dí la proporción de 16 muertos por 100 mordidos. Mi convicción es que esta proporción no es exacta todavía y que es demasiado reducida. Con esta estimación, los 1324 mordidos de Francia y Argelia habrían producido 112 muertos por rabia.

En definitiva, la eficacia del método es tal que solo en 4 casos ha sido ineficaz el tratamiento.

La difusión del método de Pasteur fue tal que en 1907 al menos 51 institutos, distribuidos por Europa, Asia, América y África, utilizaban ya vacunas contra la rabia. IyC

PARA SABER MÁS

Correspondance. Reunida y anotada por Pasteur Vallery-Radot:
Vol. 1. Lettres de jeunesse: L'étape de la cristallographie (1840-1857). Grasset, París, 1946.
Vol. 2. La seconde étape: Fermentations, générations spontanées, maladies des vins, des vers a soie, de la bière (1857-1877). Flammarion, París, 1951.
Vol. 3. L'étape des maladies virulentes: Virus-vaccins du choléra des poules, du charbon, du rouget, de la rage (1877-1884). Flammarion, París, 1951.
Vol. 4. L'étape des maladies virulentes (suite): Vaccination de l'homme contre la rage. Dernières années (1885-1895). Flammarion, París, 1951.

EN NUESTRO ARCHIVO

Louis Pasteur (1822-1895). J. M. López Piñero en *MyC* n.º 34, 2009.

por Bartolo Luque



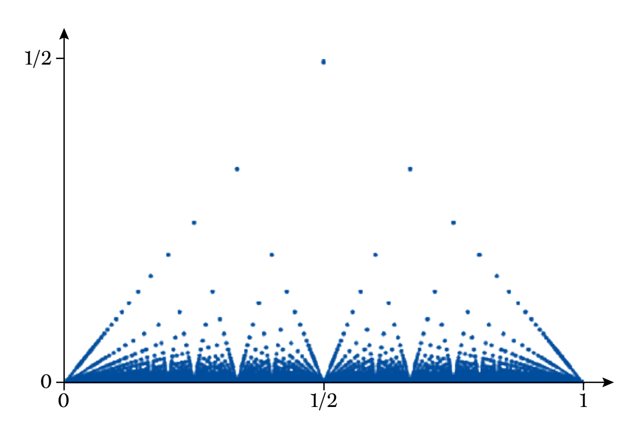
Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.

Monstruos no derivables

La función de Takagi y otros ejemplos poco habituales en nuestra educación matemática

Seguro que ha oído más de una vez que, desde un punto de vista práctico, una función es continua si podemos dibujarla sin levantar el lápiz del papel. Digo «práctico» en referencia tanto a la posibilidad de representar la función como al tipo de funciones que solemos manejar, ya que a todos nos han enseñado ejemplos famosos que contradicen esa afirmación.

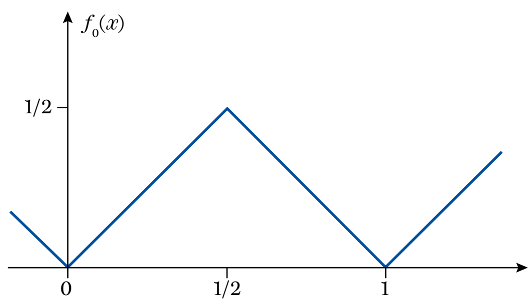
Uno de ellos es la función de Thomae, que vale 0 cuando x es irracional y $1/q$ cuando $x = p/q$, con p y q enteros en fracción irreducible. Intentar dibujar la función de Thomae, como hemos hecho en la figura 1, no nos revela que sea continua para el conjunto (denso) de los números irracionales en la recta real. Así que, cuando vemos por primera vez una función semejante, tendemos a clasificarla como una patología creada *ad hoc*.



1. LA FUNCIÓN DE THOMAE, conocida también con nombres tan sugerentes como la función de las gotas de lluvia o de las palomitas, vale 0 cuando x es irracional y $1/q$ cuando $x = p/q$. Puede demostrarse que es continua para los valores irracionales de x, algo imposible de dibujar.

En la educación matemática que recibimos tratamos casi exclusivamente con cocientes de polinomios, exponenciales, funciones trigonométricas... funciones que son continuas y derivables a excepción de un número finito o, como mucho, un infinito numerable de puntos. Escondemos engendros semejantes a la función de Thomae en el sótano y los exhibimos como monstruos de feria para ilustrar exóticas excepciones.

Una de esas ocasiones se presenta cuando examinamos la relación entre continuidad y derivabilidad. En tal caso, solemos mostrar ejemplos como la función triangular que aparece en la figura 2. Esta modesta función lineal a trozos es continua en todos sus puntos y también derivable en todos ellos a excepción de los picos. Si, por ejemplo, consideramos el punto $x = 1/2$, veremos que la tangente a la función por la izquierda tiene pendiente +1 y por la derecha −1, de modo que no nos queda más remedio que concluir que la derivada no existe en ese punto. Ejemplos como este ilustran que la derivabilidad es una condición más exigente que la continuidad: si una función es derivable, entonces seguro que es continua, pero lo contrario no es necesariamente cierto.



2. LA FUNCIÓN TRIANGULAR extendida periódicamente para toda la recta real, $f_0(x)$. Aunque es continua en todos los puntos, carece de derivada en los picos.

Derivadas inexistentes

En el siglo XIX, incluso el propio Gauss pensaba que una función continua podía carecer de derivada en, a lo sumo, un conjunto numerable de puntos. Por esa razón, el artículo que el matemático alemán Karl Weierstrass presentó en 1872 ante la Academia de Ciencias de Berlín cayó como un bombazo. Weierstrass mostró el primer ejemplo de una familia de funciones continuas que, sin embargo, no eran diferenciables en ningún punto:

$$W(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x)$$

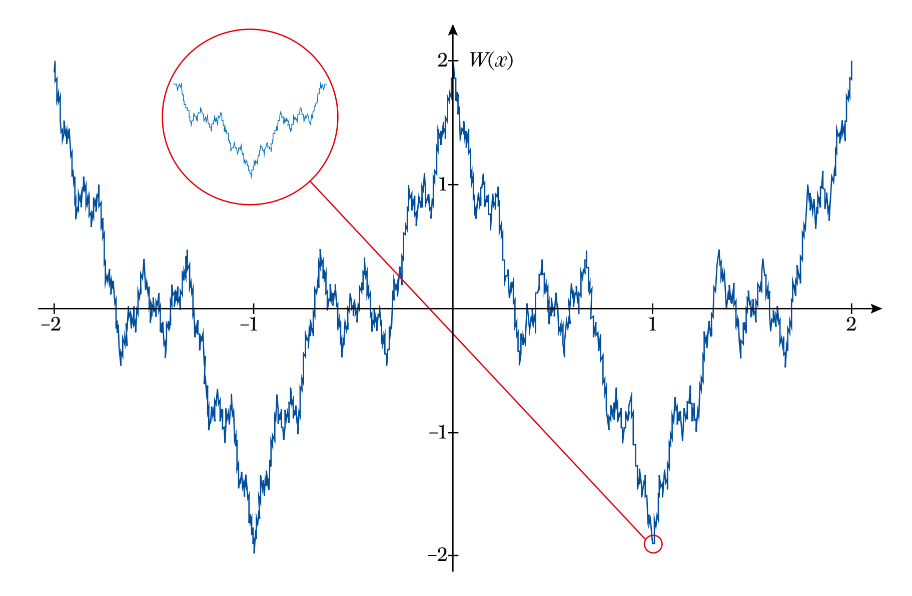
(donde a y b satisfacen ciertas restricciones).

Al respecto, el historiador de la matemática Jesper Lützen comenta lo siguiente en su libro *A history of analysis*: «La función de Weierstrass contradecía la idea intuitiva de la mayor parte de sus contemporáneos que apuntaba a que las funciones continuas eran diferenciables excepto en puntos especiales». Probablemente, uno de los mayores impedimentos fue que, en el siglo XIX, visualizar esta función era una empresa poco menos que imposible.

La función de Weierstrass, representada en a figura 3, resulta poco intuitiva incluso cuando disponemos de las ventajas gráficas de los ordenadores actuales. Por tanto, vamos a definir una función más manejable que sea continua en todos sus puntos y no derivable en ninguno, siguiendo una receta propuesta en 1903 por el matemático japonés Teiji Takagi.

El método para construir la función de Takagi tiene como base justamente nuestra función triangular periódica, a la que llamaremos $f_0(x)$.

3. FUNCIÓN DE WEIERSTRASS en el intervalo [−2,2] con $a = 0{,}5$ y $b = 2$. Esta función es continua en todos sus puntos pero no es derivable en ninguno. La ampliación de la gráfica en torno a $x = 1$ ilustra la autosemejanza de la función.



A esta base le sumamos nuestro primer ingrediente: la función

$$f_1(x) = f_0(2x)/2\ .$$

Se trata de la misma función triangular solo que más pequeña, de modo que en el intervalo unidad caben exactamente dos dientes de la mitad de altura. Después le sumamos

$$f_2(x) = f_0(2^2x)/2^2$$

y repetimos el proceso hasta el infinito. Así obtenemos la función de Takagi:

$$T(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f_0(2^n x)/2^n\,.$$

La figura 4 muestra los primeros pasos de este proceso: las aproximaciones

$$T_m(x) = \sum_{n=0}^{m} f_0(2^n x)/2^n$$

con $m = 0, 1, 2$ y 3. La figura 5 muestra la función de Takagi (en realidad, una aproximación indistinguible ya con $m = 8$).

¿Límite continuo?

Observe que estamos definiendo la función de Takagi como el límite de $T_m(x)$ cuando m tiende a infinito. ¿Será continua la función así definida?

En un principio parece que sí, ya que todas las funciones que intervienen son continuas y no estamos haciendo nada más que sumarlas. Sin embargo, precaución, amigo conductor: en el famoso libro *Calculus* de Michael Spivak encontrará una deliciosa discusión sobre la definición de una función como límite de una familia de funciones: «Todos los resultados acerca de tales funciones pueden resumirse muy fácilmente: nada de lo que era de esperar que se cumpliera se cumple en realidad».

Veamos un ejemplo. Tomemos la familia de funciones dada por

$$f_n(x) = \begin{cases} x^n;\ 0 \le x \le 1 \\ 1;\ x \ge 1 \end{cases}$$

(donde $n = 1, 2, 3...$). Todas ellas son continuas, así que, intuitivamente, parece que su límite debería serlo también. Sin embargo, al calcularlo obtenemos

$$\lim_{n\to\infty} f_n(x) = \begin{cases} 0;\ 0 \le x < 1 \\ 1;\ \ x \ge 1 \end{cases}\ ,$$

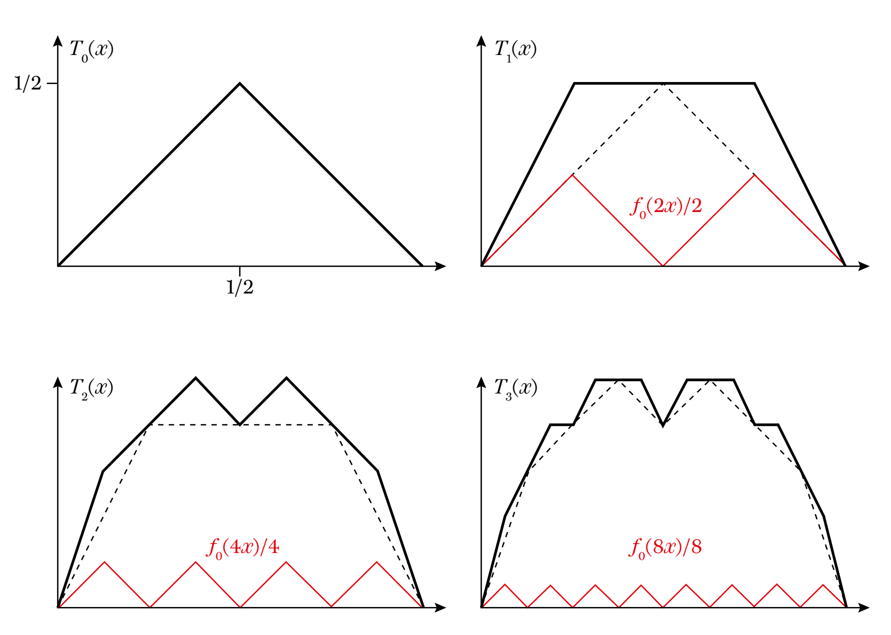
una función que presenta un salto en el punto $x = 1$ y, por tanto, no es continua. De hecho, incluso si la familia de funciones es derivable (una condición mucho más fuerte que la mera continuidad) es posible que la función límite no sea continua. Moraleja: nuestra intuición no resulta una guía adecuada en esta selva, como ya nos advertía Spivak.

La función de Takagi, no obstante, sí es continua. Resulta sencillo demostrarlo ya que es fácil ver que las sumas parciales $T_m(x)$, que son continuas, convergen a $T(x)$ de manera uniforme. ¿Y es derivable en algún punto? Pues Takagi demostró que no. La demostración de que $T(x)$ carece de derivada en todos sus puntos no es complicada, pero desbordaría el tamaño de esta columna ya desbordada y además Spivak lo explica de maravilla.

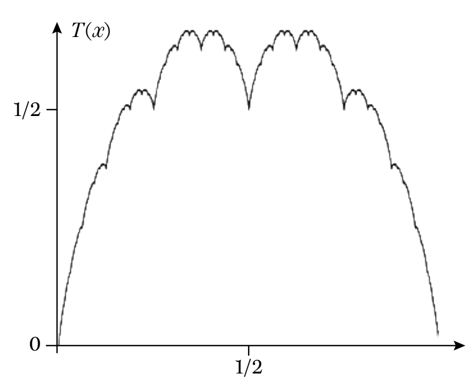
Pudin fractal

En el caso de las funciones que usamos de manera habitual, continuas y derivables, a medida que ampliamos el entorno de un punto de la gráfica, la curva se va pareciendo más y más a una recta. Que una función sea derivable en un punto implica, además de la continuidad, que podemos aproximarla linealmente en ese punto.

Sin embargo, en el caso de $W(x)$ o $T(x)$ no se cumple esta expectativa: no



4. APROXIMACIONES SUCESIVAS $T_m(x)$ a la función de Takagi en el intervalo [0,1] para $m = 0, 1, 2$ y 3. A partir de $m = 1$, se indica en rojo la función $f_0(2^m x)/2^m$ que en cada caso se añade a la aproximación anterior, mostrada en cada gráfica mediante una línea de puntos.



5. ASPECTO aproximado de la función de Takagi en el intervalo [0,1].

importa cuánto la ampliemos, la curva seguirá mostrando un zigzagueo a todas las escalas. ¿Cómo podemos verlo?

En el caso de la función de Takagi es fácil demostrar que

$$T(x) = T_{m-1}(x) + T(2^m x)/2^m$$

para cada m mayor o igual que 1. De modo que, en cada intervalo $[k/2^m, (k+1)/2^m]$ con k entero, la gráfica de $T(x)$ viene dada por una parte finita más una copia similar a toda la gráfica de $T(x)$ en $[0,1]$, solo que reducida por un factor $1/2^m$.

Esta relación, representada en la figura 6 para $m = 1$ y $m = 2$, nos dice que la función de Takagi está formada por una infinidad de minicopias a todas las escalas de sí misma. Así que, al hacer una ampliación en el entorno de un punto, no encontraremos que la gráfica se parece a una recta, sino a copias de la gráfica zigzagueante original.

Cuando dibujamos una función sin levantar el lápiz de la hoja, solo disponemos de la opción de variar la dirección. En los puntos donde existe la derivada, podemos mover nuestro lápiz por «un período corto de tiempo» en la dirección que marca la tangente; después, vamos cambiando suavemente esa dirección a medida que avanzamos.

En los puntos donde la derivada no existe, como ocurre con la gráfica de la función triangular, podemos cambiar bruscamente la dirección de nuestro trazo sin levantar el lápiz de la hoja y seguir nuestro camino. Pero ¿qué hacer con la función de Takagi, si estamos obligados a cambiar bruscamente de dirección en cada punto? Como probablemente pensaba Gauss, no es posible dibujar a mano o a máquina una función semejante. A pesar de ello, ahora somos capaces de imaginarla y trabajar con ella.

Parece que la función de Takagi y sus variantes han sido redescubiertas varias veces. La propia función de Takagi se conoce también como función de *blancmange*, por el parecido de su gráfica con un pudin de ese nombre. En 1930, el matemático holandés Bartel Leendert van der Waerden presentó una función casi idéntica a la de Takagi que en vez de utilizar doses usaba dieces:

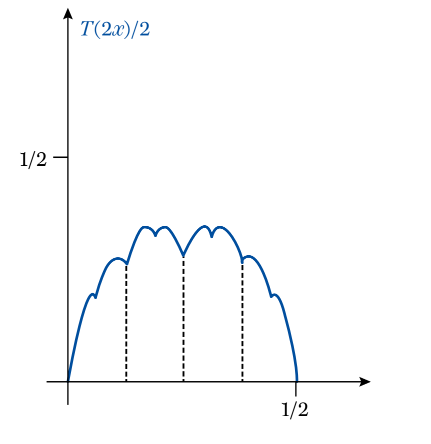
$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f_0(10^n x)/10^n \,.$$

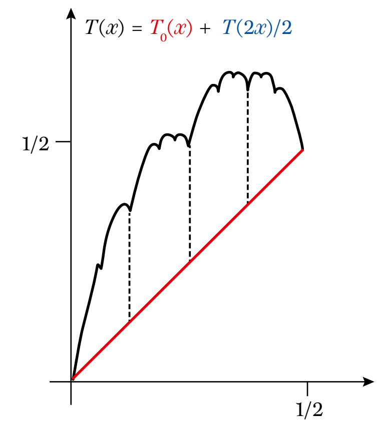
La generalización obvia,

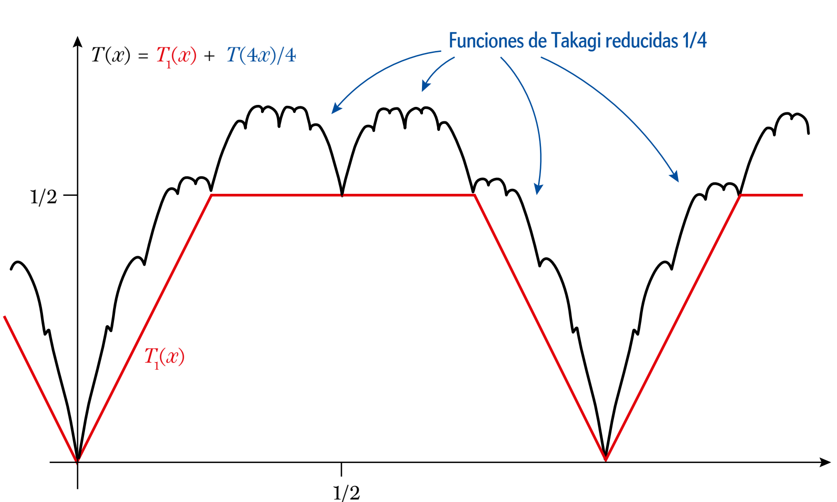
$$T_r(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f_0(r^n x)/r^n \,,$$

se conoce hoy como clase Takagi y se entiende como un caso particular de un grupo mucho mayor: las curvas fractales de Rham, en honor al matemático suizo Georges de Rham.

Hoy, tras la revolución fractal de Mandelbrot, empleamos de manera cotidiana este tipo de funciones en física. Y los matemáticos han demostrado que casi todas (en el sentido de categoría de Baire) las funciones continuas no tienen derivada en ningún punto. De modo que, como ya no nos caben tantos monstruos en el sótano, quizá vaya siendo hora de dejarlos en libertad y aprender a convivir con ellos.







6. ILUSTRACIÓN de la relación $T(x) = T_{m-1}(x) + T(2^m x)/2^m$ para $m = 1$ y $m = 2$. La función de Takagi exhibe copias escaladas no linealmente de sí misma a todas las escalas.

PARA SABER MÁS

A simple example of the continuous function without derivative. T. Takagi en *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan*, vol. 1, págs. 176-177, 1903.

Calculus. Michael Spivak. Editorial Reverté, 1970.

What do we «see» in geometric pictures? (the case of the blancmange function). David Tall y Silvia Di Giacomo en *Progetto Alice*, vol. 1, págs. 321-336, 2000. Disponible en inglés en **homepages.warwick.ac.uk/staff/David.Tall/pdfs/dot2000f-blancmange-english.pdf**

La función de Takagi. Alejandra Gaitán y Ricardo A. Sáenz en *Miscelánea Matemática*, vol. 61, págs. 43-55, 2015.



¡NO SEAS NEANDERTAL!
Y OTRAS HISTORIAS SOBRE LA EVOLUCIÓN HUMANA

Sang-Hee Lee con Shin-Young Yoon
Debate, 2018

Retorno al presente

Un relato original sobre la génesis del ser humano y su constante evolución

Muchos suponen que la paleoantropología solo se ocupa del pasado. El razonamiento es que, más allá de la curiosidad y de un interés algo romántico por conocer los primeros movimientos de nuestros ancestros, esta disciplina no puede aportar mucho más al conocimiento de los humanos actuales. En *¡No seas neandertal!*, la paleoantropóloga surcoreana Sang-Hee Lee rebate este punto de vista. La obra nos muestra a nosotros mismos como el resultado viviente —y, cabe destacar, todavía cambiante— de una magnífica interacción entre la biología y la selección natural durante unos seis millones de años, desde que los homininos se separaron del linaje de los chimpancés.

Alejándose del discurso tradicional, Lee ofrece un viaje original a lo largo de nuestro singular camino evolutivo, desde las criaturas simiescas bípedas al comportamiento complejo. ¿Cuándo perdieron el pelaje nuestros antepasados? ¿Cambió el gusto por la carne nuestro destino? ¿Fue la agricultura una bendición o una condena? ¿Es el altruismo una singularidad nuestra? De manera concisa y atrayente, Lee reexamina estas y otras cuestiones sobre la historia de nuestra especie aún en evolución y proporciona algunas respuestas poco habituales.

En particular, Lee apoya el multirregionalismo: la teoría de que los humanos modernos se originaron en varios lugares a la vez, en contraposición con el modelo de la «salida de África», que plantea un único origen para nuestra especie [*véase* «Huellas de un pasado lejano», por Gary Stix; Investigación y Ciencia, septiembre de 2008]. Así, rebate las interpretaciones, a veces rígidas, del registro fósil propuestas en una bibliografía donde predominan el inglés y la comunidad científica occidental. En el libro, Asia reaparece como el lugar de nacimiento de los humanos modernos y de sus antepasados. Lee nos recuerda que los fósiles de homininos de Dmanisi, en la República de Georgia, son tan antiguos como los primeros descubiertos en África. Y que *Homo erectus* podría haberse originado en Asia y migrado a África para dar allí origen a especies posteriores de *Homo*. También analiza a los denisovanos, los misteriosos homininos que coexistieron con los humanos modernos y que dejaron gran cantidad de ADN pero escasos fósiles. Lee se refiere a ellos como «los neandertales asiáticos», para resaltar que la reconstrucción de la historia evolutiva de los homininos europeos no debería desvincularse de la de sus primos del continente vecino.

No toda la obra versa sobre el pasado. ¿Siguen evolucionando los humanos? Solemos pensar que la interacción con el mundo a través de la cultura y la tecnología (como la ropa, las herramientas o los medicamentos) ha mitigado la presión sobre nuestro cuerpo para adaptarse biológicamente al medio. Lee cuestiona esta idea y aporta una sucesión de pruebas sobre la continua evolución humana.

Al respecto, señala los estudios sobre el color de la piel. Suele considerarse que la piel oscura evolucionó en los primeros homininos africanos sin pelo para protegerlos de la radiación ultravioleta. Quienes vivían en latitudes más altas habrían estado expuestos a una menor radiación y, por tanto, necesitaron menos melanocitos activos (las células que producen melanina). Ello puede explicar en gran medida la piel más clara de las poblaciones más alejadas del ecuador. Sin embargo, el genetista Ian Mathieson, de la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores analizaron una amplia muestra de ADN antiguo de poblaciones euroasiáticas occidentales, las cuales revelaron que la piel clara de los europeos se debe a una variante genética que apareció hace no más de 4000 años. Asocian la piel más clara de estas poblaciones a la llegada de la agricultura y al estilo de vida comunal y sedentario, una tesis que Lee apoya.

La autora argumenta que el cambio a la agricultura condujo a una dieta basada en cereales y féculas procesados, y deficitaria en nutrientes esenciales, entre ellos la vitamina D. Ello obligó al cuerpo a sintetizarla: un proceso metabólico que requiere la absorción de luz ultravioleta a través de la dermis. La mutación que dio lugar a una piel más pálida en los europeos, identificada por Mathieson, maximizaría esa absorción en las poblaciones con baja ingesta de vitamina D. Con este ejemplo, Lee subraya que la cultura (en este caso, la agricultura y el cambio en la dieta) podría incluso haber acelerado la evolución [*véase* «El futuro de la evolución humana», por John Hawks; Investigación y Ciencia, noviembre de 2014].

La agricultura conllevó también una explosión demográfica, a pesar del aumento de las enfermedades infecciosas en las comunidades sedentarias. La disponibilidad de cereales permitió el destete de los niños a edad más temprana y acortó el intervalo entre partos. El incremento de población resultante conllevó una mayor diversidad genética, «la materia prima de la evolución». Otra muestra de que nuestra biología aún está sujeta al cambio es la mutación de la lactasa, la cual ha permitido que, durante al menos los últimos 5000 años, algunos humanos puedan digerir leche en la edad adulta. Esta excentricidad, menos común en el este asiático, resultó una ventaja clave para los pastores y podría constituir un mecanismo adicional para superar la escasez de vitamina D, dado que la leche de vaca es rica en este nutriente.

Por otro lado, la vida en comunidad es capital para el éxito de nuestra especie. Como apunta Lee, los grupos grandes resultaron esenciales para la supervivencia, ya que ofrecieron la asistencia necesaria para superar las dificultades de parir crías con un gran cerebro y cuidarlos durante una larga infancia [*véase* «*Homo infans*», por Ana Mateos; Investigación y Ciencia, noviembre de 2018]. Los humanos modernos también son la especie primate con mayor esperanza de vida: tres generaciones pueden solaparse en el tiempo. Los

individuos siguen siendo «útiles» más allá de su periodo reproductivo; cuidan a los hijos de su progenie e incluso a otros niños sin relación de parentesco. Como explica Lee, el concepto de «parientes ficticios» (lazos estrechos con personas de fuera de la familia o el matrimonio) es exclusivo de los humanos. Menciona los restos de un hominino anciano de Dmanisi, datado en 1,8 millones de años, que sin duda sobrevivió durante algún tiempo sin dientes en una época sin herramientas complejas ni conocimientos sobre cómo controlar el fuego. Ello podría indicar que el grupo trataba a sus individuos con compasión; sus fósiles podrían constituir la prueba más antigua del comportamiento altruista humano.

Lee posee un estilo desenfadado. Uno de los capítulos trata sobre el *Gigantopithecus,* un simio enorme descubierto en China que podría haber coexistido con *Homo erectus* hace entre 1,2 millones y 300.000 años. Otro versa sobre el dolor de espalda como contrapartida al bipedalismo. En ocasiones, esta accesibilidad incurre en la simplificación, y en otras se adentra en un terreno en el que todos los atributos parecen tener una función o haber evolucionado para un propósito.

A pesar de todo, la autora conseguirá ilustrar incluso a los especialistas con sus esfuerzos por dilucidar un campo a menudo visto como árido e inescrutable. *¡No seas neandertal!* incide en la importancia del pasado. Nuestros seis millones de años de historia han sido moldeados en gran medida por el azar y el entorno cambiante. Lee muestra que, ahora más que nunca, nuestras decisiones pueden determinar el futuro de la Tierra y de sus habitantes, nosotros incluidos.

—María Martinón-Torres
Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana
Burgos

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 554, págs. 296-297, 15 de febrero de 2018.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2018

Con la colaboración de nature



EL GUSTO POR LA BELLEZA
BIOLOGÍA DE LA ATRACCIÓN
Michael J. Ryan
Antoni Bosch, 2018

Estética y selección sexual

La belleza, motor de la evolución

La belleza nos envuelve y nos hace diversos. Lejos de ser una cualidad exclusiva de humanos avanzados, la ciencia ha demostrado que se encuentra también en el cromatismo desplegado por algunos organismos, en los olores que despiden otros o en los cantos de solicitud y reclamo de unos terceros. Ahí la perciben determinadas regiones del cerebro, entendiendo que no es que el cerebro haya evolucionado para aprehenderla, sino que es dicho órgano el que establece lo que es bello. En las limitaciones y restricciones cerebrales se origina la inmensa diversidad de estéticas sexuales que se producen en el reino animal. En otras palabras, para entender la belleza necesitamos entender el cerebro.

En el mundo vivo, la belleza cumple una función evolutiva, asociada por consiguiente a la reproducción. En la interacción sexual, el principal portador de la iniciativa en el mundo animal es el macho, que desarrolla una serie de caracteres que las hembras encuentran placenteros, como la cola del pavo real, el croar de las ranas o la pauta de las escamas de la perca argéntea (*Hyperprosopon argenteum*). Pero es el cerebro de la hembra el que, a modo del teatrillo de marionetas, impulsa la evolución de la belleza en el macho. Michael J. Ryan, profesor de zoología en la Universidad de Texas y adscrito al Instituto Smithsoniano de Investigación Tropical de Panamá, ha renovado el campo de la selección sexual, la elección de pareja y la comunicación animal con sus trabajos teóricos fundados en la observación de ranas túngara (*Engystomops pustulosus*) en su hábitat de la pluviselva panameña.

Para explicar por qué el mundo animal abunda en despliegues de belleza, Darwin ideó la teoría de la selección sexual. Sostenía que a los animales les atrae lo hermoso, atracción que se convertía en incitación a la evolución de sus compañeros de pareja para que adquirieran caracteres que los hicieran compañeros sexualmente deseables y genéticamente eficaces. La selección sexual darwinista presentaba, pues, una visión estética. Darwin repetía que las preferencias de apareamiento reflejaban una facultad estética, que mostraban un gusto por lo bello. No se trataba de una metáfora; muy al contrario, lo convirtió en el núcleo central del mecanismo de la evolución: el establecimiento de determinados caracteres sexuales secundarios por elección de la pareja era un mecanismo estético. Más recientemente, se ha matizado que la selección sexual debía incluir la calidad de la pareja escogida.

La evolución estética requiere una evaluación sensorial de la información que llega al receptor. «Evaluación» significa no solo una distinción meramente cognitiva de la señal con respecto al ruido de fondo, sino también la comparación cognitiva de la señal con un molde innato, con otros ejemplos de la misma señal percibida simultáneamente de otros señalizadores, o con recuerdos de señales previamente observadas. Esa evaluación da como resultado la expresión de una preferencia o de una elección, e incluye la oportunidad de que el carácter sea preferido sin comunicación ulterior de información. Afirmar que la elección de la pareja entraña la adquisición eficiente de información supone que las preferencias por la pareja caen bajo la selección natural para codificar información de beneficios directos o de genes óptimos.

La visión estética darwinista de la selección sexual era también explícitamente coevolutiva: alcanza su mayor complejidad a través de la coevolución de una señal y su evaluación sensorial y cognitiva. En breve, la evolución estética requiere un componente del fenotipo, que funciona como una señal a través de la percepción por otro individuo, y demanda una evaluación sensorial-cognitiva de tales percepciones por el receptor. Ello nos conduce al ejercicio de la preferencia o la elección, y exige la coevolución de la señal y del proceso de evaluación.

Darwin exponía que la selección sexual se daba entre variaciones en la oportunidad para contraer pareja. Semejante mecanismo de selección sexual podía dar origen a caracteres arbitrarios. Para Alfred Russel Wallace, el concepto de selección sexual daba por supuesta la hipótesis adaptativa de que la selección natural de las preferencias de pareja constituye la fuerza determinante de la selección intersexual. Wallace sostenía que muchos caracteres conspicuos de los fenotipos masculinos eran meros productos colaterales de una función poderosa del organismo. En esa línea, las exhibiciones de cortejo resultaban expresiones externas incidentales de un vigor y exuberancia internos de masculinidad. Una argumentación ingeniosa, aunque muy cuestionable. Muchos biólogos evolutivos contemporáneos siguen la huella de Wallace, quien nunca negó la posibilidad de evolución por elección de pareja, y creen que la selección natural es la única fuente de forma y diseño en el mundo vivo.

El sentido de belleza, considerado una de las fuerzas selectivas más poderosas y controvertidas de la naturaleza, se encuentra en la mente y en el ojo del observador. En efecto, las llamadas, los chasquidos y el croar están diseñados para informar y seducir a la pareja. Pero pueden atraer también a depredadores hambrientos. La supervivencia es secundaria al sexo, una adaptación para mantener vivos a los animales. En un comienzo, Darwin lanzó la hipótesis de que los colores brillantes y la refinada ornamentación de los machos se adquirieron en el curso de la evolución en respuesta a las preferencias de las hembras por un macho estético. En virtud de ese razonamiento, los caracteres sexuales secundarios potencialmente costosos del macho no habrían evolucionado en respuesta a una selección en pro de la demostración de vigor, sino en respuesta a preferencias ocultas, no funcionales, de las hembras.

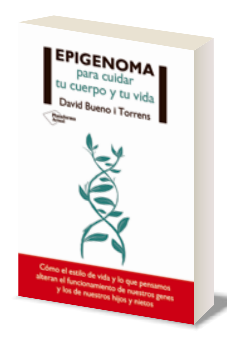
Pensemos en el color. ¿Por qué nos conmueven tanto una puesta de sol o el arcoíris en el firmamento? El proceso de visión comienza en los ojos, en los fotorreceptores de la retina. Hay dos tipos de fotorreceptores: bastoncillos y conos. Los bastoncillos nos permiten ver en niveles de baja luz, mientras que los conos nos dan acceso al color y a la belleza que viene con él. Compartimos la visión del color con los monos y los grandes primates. Otro atributo importante de nuestra escena visual es la pauta o patrón, de importancia en determinadas facetas del arte, como el expresionismo abstracto. Esos y otros aspectos condicionan la estética del animal y mueven la evolución de la belleza sexual, que en ocasiones supera al arte.

Por lo que concierne al patrón, los sistemas visuales de otros animales son particularmente sensibles y reaccionan según determinadas pautas. Por ejemplo, los trabajos de David Hubel y Torsten Wiesel sobre el sistema visual de gatos demostraron que las neuronas individuales respondían a los contornos de una orientación específica. Gracias a su sistema de reconocimiento de pautas, los gatos se mostraban sumamente sensibles a los bordes, lo que les preservaba de caer al vacío.

—Luis Alonso

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



EPIGENOMA PARA CUIDAR TU CUERPO Y TU VIDA
David Bueno i Torrens
Plataforma Editorial, 2018
ISBN: 9788417376437
264 págs. (18 €)

USTED ESTÁ AQUÍ
UNA HISTORIA DEL UNIVERSO
Christopher Potter
Crítica, 2018
ISBN: 978-84-9199-016-1
304 págs. (19,90 €)


LA MÚSICA Y LOS NÚMEROS
DE PITÁGORAS A SCHOENBERG
Eli Maor
Turner, 2018
ISBN: 978-84-17141-73-8
220 págs. (21,90 €)




LA INVENCIÓN DE UNO MISMO
LA VIDA SECRETA DEL CEREBRO ADOLESCENTE
Sarah-Jayne Blakemore
Ariel, 2018
ISBN: 978-84-344-2941-3
288 págs. (19,90 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

ENERO

1969

El debate sobre el aborto

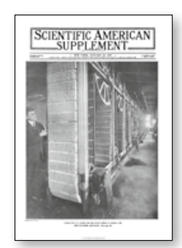
«En el mundo moderno, el aborto continúa siendo el método de control de la fecundidad más generalizado y clandestino. La práctica ha sido legalizada por varios países en los últimos años y, en consecuencia, el aborto provocado está saliendo de las sombras y se ha convertido en tema de discusión y controversia a escala mundial. El debate abarca una amplia gama de consideraciones: morales, éticas, médicas, sociales, económicas, legales, políticas y humanitarias. La experiencia de los países que lo han legalizado ya está empezando a facilitar un conjunto de datos fiables con los que pueden evaluarse las ventajas y los inconvenientes de esa práctica. En Estados Unidos, el aborto no fue un delito contemplado por la ley hasta 1830 aproximadamente. Hoy sigue prohibido en la mayoría de los estados de la Unión salvo en casos de grave riesgo para la vida de la madre.»

Danza de los sólidos

«Átomos son todas las cosas:
la tierra y el agua, el aire
y el fuego, todo,
adivinó Demócrito.
El suizo Paracelso,
en su guarida alquímica,
vio el azufre, la sal
y el mercurio mostrándose
entre las milenarias
esperanzas de fabricar oro.
Lavoisier destronó al flogisto;
luego el análisis molecular
hizo audaces incursiones
en los gases: el hidrógeno
se mostró desnudo
a los deslumbrados ojos
de los sabios.

—John Updike»

El 27 de este mes de enero se cumplen diez años del fallecimiento de John Updike. Aquí se ofrece la primera estrofa de las once que componen el poema de Updike, quien para escribirlo se inspiró en el número de septiembre de 1967 de Scientific American *sobre materiales.*



1969



1919

1869

1919

Los dirigibles y el fuego

Lo que ha llegado casi a jubilar al dirigible como máquina de guerra no es el aeroplano; es el excesivo riesgo de incendio que implica el uso del hidrógeno, gas merced al cual hasta ahora los dirigibles flotan en el aire. El helio, gas inerte y no inflamable, el segundo gas más ligero de los conocidos (el hidrógeno es el primero), es relativamente abundante en todos los minerales que contienen radio, torio o uranio, como la torianita, la cleveita, etcétera. Pero su extracción a partir de esos minerales ha supuesto tal inversión (entre 50.000 y 210.000 dólares por metro cúbico) que su uso como sustituto del hidrógeno nunca se había considerado en serio. En la primavera próxima, se producirá en EE.UU. helio a escala industrial a un costo inferior a medio dólar por metro cúbico, lo que da una idea de la magnitud del logro.»

La Ley de Control del Helio de 1927 puso fin a la exportación del gas. Entidades extranjeras, como la alemana Compañía de Transporte Zeppelin, tuvieron que conformarse con el inflamable hidrógeno.



1919: En la posguerra, un tanque ligero Renault FT desarmado es puesto en servicio como remolcador de barcazas de canal. Aunque de escasa eficacia, puede que la gran cantidad de caballos muertos en la Gran Guerra lo hicieran necesario.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXX, N.º 2, 11 DE ENERO DE 1919

1869

La pesca del arenque

«El doctor Louis Feuchtwangler, tras regresar de un viaje por la costa este [Maine], nos informa de algunos hechos sobre la pesca del arenque. Nos explica que esta temporada ha sido la más productiva desde hace muchos años. El 12 de octubre se consiguieron 80 toneles de arenques en una sola captura, y treinta toneles dos mareas antes. Cada dos toneles rinden un barril de aceite con un precio de mercado de 22,50 dólares por barril, aceite que sirve para almohazar cuero y para mezclar con otros aceites de pescado o lubricantes. Además, de ese producto, lo que queda de cada cinco toneles de pescado producirá una cuba de piedra pómez o guano de pescado, el mejor abono conocido y que se cotiza él solo a 20 dólares por cuba.»

Plaga de conejos

«El conejo llevado de Inglaterra a Australia amenaza ahora con convertirse en una plaga de magnitudes casi egipcias en las lejanas y poco pobladas planicies. Hace solo un año o dos no se veía un conejo, salvo como curiosidad en un conejar. Ahora que la plaga está en pleno apogeo podemos, sin ningún esfuerzo, considerar lo que nadie previó. En Inglaterra el conejo silvestre es presa de muchos cazadores; aquí lo es de muy pocos.»

El timo del whisky

«El *New York World* ha prestado un servicio al país con sus investigaciones acerca de la calidad de los licores que se sirven en los diferentes bares de esta ciudad. Se examinaron un gran número de muestras del brandy que se expende entre treinta y cincuenta centavos el vaso, y solo en dos casos se hallaron auténticas. Si tal es el caso de los licores que se sirven en los mejores sitios, cuál será la calidad de lo que se expende en los locales ínfimos en los que puede consumirse un vaso de whisky por cinco a diez centavos.»



INFORME ESPECIAL

Ideas que cambian el mundo 2019

VV.AA.

Diez técnicas emergentes destacan por su potencial de innovación. Comprenderlas ayudará a la sociedad a sacarles el máximo provecho.

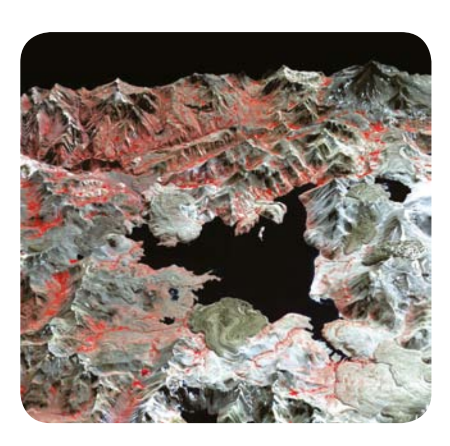


GEOLOGÍA

Un infierno oculto

Shannon Hall

Bajo la superficie de Chile podría estar fraguándose un supervolcán con un interior frío que trastoca nuestras ideas sobre los mecanismos que disparan enormes erupciones.



MATEMÁTICAS

El lenguaje de las matemáticas

Daniel S. Silver

La manera en que se conciben términos y símbolos para representar conceptos matemáticos ha ido cambiando a lo largo de la historia. ¿Tiene el «pensamiento puro» lenguaje propio?

SALUD

La endometriosis, un misterio doloroso

Jena Pincott

Esta enfermedad, que se extiende por el cuerpo como la hiedra causando dolores insoportables e infertilidad, afecta a unos 176 millones de mujeres en el mundo. Nuevas investigaciones despiertan la esperanza de lograr pronto mejores tratamientos.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Andrés Martínez: *Apuntes* y *Desigualdad económica y salud pública*; Javier Grande: *Apuntes* y *Las primeras galaxias del universo*; Ana Mozo: *¿Cuántos genes tiene nuestro genoma?* y *Eliminación de desechos tóxicos del cerebro*; Gonzalo Claros: *Despierta la hipnopedia*; Mercè Piqueras: *Las fronteras de la vida*; Miguel Ángel Vázquez Mozo: *¿Cómo deberían ser las teorías de los sistemas complejos?*; Fabio Teixidó: *La ciencia de la desigualdad* y *El coste ambiental de la desigualdad*; Marián Beltrán: *La desigualdad en EE. UU.*; José Óscar Hernández Sendín: *La automatización de los prejuicios*; Ramón Muñoz Tapia: *Cómo construir un sensor de efecto Hall con bismuto*; J. Vilardell: *Hace...*

Copyright © 2018 Scientific American Inc.,
1 New York Plaza, New York, NY 10004-1562.

Copyright © 2019 Prensa Científica S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Puedes adquirirlo en quioscos y en nuestra tienda

www.investigacionyciencia.es

Teléfono: 934 143 344 | administracion@investigacionyciencia.es